

UFPA

PPGEC

Universidade Federal do Pará



Daniela Baia da Costa

Influência do agregado reciclado no comportamento do concreto permeável

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo Professor Alcebíades Negrão Macêdo

Belém – Pará – Brasil

2024

INFLUÊNCIA DO AGREGADO RECICLADO NO COMPORTAMENTO DO CONCRETO PERMEÁVEL


AUTORA:

DANIELA BAIA DA COSTA


DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRA EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 27 / 02 / 2024.


BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 **ALCEBIADES NEGRAO MACEDO**
Data: 16/05/2024 14:10:58-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>


Prof. Dr. Alcebiades Negrão Macêdo
Orientador (UFPA)

Documento assinado digitalmente
 **GEILMA LIMA VIEIRA**
Data: 08/05/2024 21:07:12-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Profa. Dra. Geilma Lima Vieira
Membro Externo (UFES)

Documento assinado digitalmente
 **LUCIANA DE NAZARE PINHEIRO CORDEIRO**
Data: 16/05/2024 14:23:25-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro
Membro Interno (UFPA)

Documento assinado digitalmente
 **MARCELO DE SOUZA PICANÇO**
Data: 06/05/2024 15:59:58-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira
Coordenador do PPGE / ITEC / UFPA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C837i Costa, Daniela.
Influência do agregado reciclado no comportamento do
concreto permeável / Daniela Costa. — 2024.
74 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Alcebiades Negrão
Coorientador(a): Prof. Dr. Luciana Cordeiro
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil, Belém, 2024.

1. Agregado Reciclado. 2. Concreto Permeável. 3.
Redução de emissões de CO2. I. Título.

CDD 624

AGRADECIMENTOS

O caminho para a construção de um trabalho de mestrado demanda tempo, estudo, nos mostra dificuldades e realizações. Para chegar até aqui, não poderia deixar de agradecer a todas as pessoas que amo e que ajudaram nessa caminhada

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, nosso pai todo poderoso, e a Nossa Senhora de Nazaré, pela fé e proteção que sempre me deram.

Aos meus pais Rose e Fernando por todo apoio, incentivo principalmente a educação, conselhos e sempre me ajudarem em todas as áreas da minha vida. Obrigada por me mostrarem o verdadeiro amor.

A minha irmã Fernanda, minha melhor amiga, meu alicerce, com quem sempre posso contar e dividir tudo, que mesmo longe está sempre presente comigo.

Ao meu namorado Hiann, por caminhar comigo nesses 11 anos, desde antes da UFPA, e agora está aqui na minha etapa a caminho de ser mestre. Obrigada pelo amor, amizade e apoio de sempre.

À minha professora coorientadora Prof^a. Dr^a. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro, que é meu verdadeiro exemplo de profissional: estudiosa, dedicada, responsável e humana. Agradeço muito por todos os conselhos, direcionamentos e por colaborar com a minha trajetória acadêmica.

Agradeço aos meus parceiros acadêmicos Caio Bastos, Caroline Menezes e Tiago Braga pelas discussões e apoio quando tive dúvidas. Vocês são grandes profissionais.

À Universidade Federal do Pará (UFPA) que foi minha casa por muitos anos e tenho muito orgulho de ter me formado e continuar trilhando meu caminho nessa Universidade que é a melhor do Norte.

Obrigada a todos!

RESUMO

COSTA, Daniela Baia da. **Influência do agregado reciclado no comportamento do concreto permeável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, 2024.

O uso de resíduos de construção civil em projetos de concreto permeável é uma estratégia importante para alcançar a sustentabilidade ambiental. Além de reutilizar materiais disponíveis, o uso de materiais alternativos pode reduzir a extração de elementos naturais, melhorar a qualidade do ar e do solo e contribuir para a gestão adequada de resíduos. Em conformidade com a preocupação global com a sustentabilidade, o uso de RCC em projetos de concreto permeável tem sido objeto de estudo em todo o mundo. No entanto, são necessárias mais pesquisas para avaliar a performance a longo prazo e garantir a conformidade com as especificações técnicas. O objetivo do trabalho é avaliar a influência do agregado reciclado na produção de concreto permeável, produzido com seixo que é o agregado graúdo mais utilizado na região Norte, com foco nas propriedades físico-mecânica do material agregado reciclado de concreto.

Dois tipos de agregados foram utilizados: seixo rolado e reciclado, com faixas compreendidas nos intervalos 9,5 - 4,75 mm e 4,75 - 2,38 mm, e teores de substituição do material natural pelo reciclado de 0%, 50% e 100%. Os resultados apontam que em termos de comportamento mecânico, as placas de concreto permeável atenderam as normas de tração na flexão, porém para o ensaio de compressão as amostras com 50% e 100% não atenderam, mas se aproximaram de trabalhos da literatura realizados com brita na composição do RCC. Em termos de permeabilidade, os resultados foram satisfatórios para todos os traços. Diante dos parâmetros citados, o traço de referência apresentou a melhor mistura, porém a mistura com 50% de RCC possui potencial, com ajustes em trabalhos futuros, para aplicação como pavimento.

Palavras-chave: Agregado reciclado; resíduo de construção civil; concreto permeável; seixo rolado; cerâmico.

ABSTRACT

COSTA, Daniela Baia da. **Influence of recycled aggregate on the behavior of permeable concrete**. Dissertation (Master's Degree in Civil Engineering), Graduate Program in Civil Engineering, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, 2024.

The use of construction waste in pervious concrete projects is an important strategy for achieving environmental sustainability. In addition to reusing available materials, the use of alternative materials can reduce the extraction of natural elements, improve air and soil quality, and contribute to proper waste management. In line with the global concern for sustainability, the use of RCC in pervious concrete projects has been the subject of study throughout the world. However, more research is needed to assess long-term performance and ensure compliance with technical specifications. The objective of this work is to evaluate the influence of recycled aggregate on the production of permeable concrete, produced with pebbles, which is the most widely used coarse aggregate in the North region, focusing on the physical-mechanical properties of recycled concrete aggregate material.

Two types of aggregates were used: rolled and recycled pebble, with ranges ranging from 9.5 - 4.75 mm to 4.75 - 2.38 mm, and 0%, 50% and 100% recycled material replacement levels. The results indicate that in terms of mechanical behavior, the permeable concrete slabs met the tensile standards in the bending, but for the compression test the samples with 50% and 100% did not meet but were close to studies in the literature carried out with gravel in the composition of the RCC. In terms of permeability, the results were satisfactory for all traces. In view of the parameters mentioned, the reference trace presented the best mixture, but the mixture with 50% RCC has potential, with adjustments in future studies, for application as a pavement.

Keywords: Recycled aggregate; construction waste; permeable concrete; rolled pebble; ceramic.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Exemplo de agrupamento em esferas de mesmo diâmetro, semelhante à organização de estruturas cristalinas do tipo CFC.....	23
Figura 2: Tipos de poros do concreto permeável.....	31
Figura 3: Vazios na matriz do concreto permeável.....	32
Figura 4: Fluxograma do programa experimental	34
Figura 5: Agregados: (a) seixo e (b) concreto reciclado.....	37
Figura 6: Ordem de mistura dos materiais	39
Figura 7: Produção do concreto permeável	41
Figura 8: Corpos-de-prova obtidos das placas de concreto.....	42
Figura 9: Esquema de caracterização hídrica.....	44
Figura 10: Análise visual de efeito parede no CPER-100	47
Figura 11: Densidade e índice de vazios no estado endurecido	47
Figura 12: Porosidade total e efetiva	48
Figura 13: Caracterização hídrica.....	49
Figura 14: Correlação porosidade total e coeficiente de permeabilidade	50
Figura 15: Correlação porosidade efetiva e coeficiente de permeabilidade	51
Figura 16: Valores médios de resistência a compressão simples.....	52
Figura 17: Valores médios de tração na flexão.....	52
Figura 18: Gráfico comparativo de resistência a compressão	55
Figura 19: Resistência a compressão de “CPER-” <i>versus</i> “GRAUDO_C_”	56
Figura 20: Comparativo de porosidade Costa (2024) <i>versus</i> Oliveira (2020).....	57
Figura 21: Comparativo de permeabilidade Costa (2024) <i>versus</i> Oliveira (2020)	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores normativos para os parâmetros de acordo com cada instituição ..	22
Tabela 2: Variáveis de resposta e suas diretrizes.....	36
Tabela 3: Caracterização dos agregados	37
Tabela 4: Consumo de materiais em massa.....	38
Tabela 5: Avaliação do concreto permeável	46

LISTA DE SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI: American Concrete Institute

ARC: Agregado reciclado de concreto

ASTM: American Society for Testing and Materials

CO₂: Dióxido de Carbono

COP26: Conferência das Partes

CPER: Concreto Permeável

FC: Fator de Compactação

ICPI: Interlocking Concrete Pavement Institute

LID: Tecnologia de Baixo Impacto

NCPTC: National Concrete Pavement Technology Center

MEC: Método do Empacotamento Compressível

RCC: Resíduo de Construção Civil

UFPA: Universidade Federal do Pará

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	12
1.2. JUSTIFICATIVA.....	13
1.3. QUESTÃO DA PESQUISA.....	15
1.4. HIPÓTESE DA PESQUISA	15
1.5. OBJETIVOS	15
1.5.1. Geral.....	15
1.5.2. Específicos	15
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. CONCRETO PERMEÁVEL	16
2.2. ASPECTOS NORMATIVOS DO CONCRETO PERMEÁVEL.....	17
2.2.1. Permeabilidade.....	17
2.2.2. Resistência a tração na flexão.....	20
2.2.3. Resistência a compressão.....	21
2.3. EFEITO E TIPO DE GRANULOMETRIA DO AGREGADO DO CONCRETO PERMEÁVEL	22
2.4. EFEITO DOS LIGANTES E MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES NO COMPORTAMENTO DO CONCRETO PERMEÁVEL.....	25
2.5. MÉTODOS DE DOSAGEM PARA O CONCRETO PERMEÁVEL.....	28
2.6. INTERCONNECTIVIDADE DAS MISTURAS COM CONCRETO PERMEÁVEL.....	31
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	33
3.1. PLANEJAMENTO	33
3.1.1. Fatores controláveis	34
3.1.2. Fatores fixos.....	35
3.1.3. Variáveis de resposta	35
3.2. MATERIAIS	36
3.3. MÉTODOS	38
3.3.1. Dosagem e produção de concretos permeáveis.....	38
3.3.2. Análise do efeito do agregado reciclado no comportamento físico- mecânico do concreto permeável.....	42
3.3.3. Análise do efeito do agregado reciclado no comportamento hídrico do concreto permeável.....	44
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	46

4.1.	EFEITO DO TIPO DE AGREGADO NA ANÁLISE VISUAL DO CPER.....	46
4.2.	EFEITO DO TIPO DE AGREGADO NOS PARÂMETROS FÍSICOS DO CPER	47
4.3.	EFEITO DO TIPO DE AGREGADO NA DRENAGEM DO CPER.....	49
4.4.	ANÁLISE DO TIPO DE AGREGADO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CPER.....	51
4.5.	ANÁLISE DOS RESULTADOS EM UM CENÁRIO GERAL DE TRABALHOS COM CONCRETO PERMEÁVEL.....	54
5.	CONCLUSÕES.....	59
6.	REFERÊNCIAS	61

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A demanda mundial por concreto tem aumentado significativamente nas últimas décadas, tornando-se um dos materiais mais utilizados na construção civil (ACI, 2019). No entanto, a produção de concreto é uma atividade intensiva em emissões de gases de efeito estufa, especialmente o dióxido de carbono (CO₂) (Busch et al, 2022). De acordo com Felix e Possan (2018), a produção de cimento, que é o componente chave do concreto, é responsável por cerca de 7% das emissões globais de CO₂.

Visando isso, a COP26 em 2021 reuniu 200 países, com objetivo de estabelecer a necessidade de redução de emissão de dióxido de carbono em até 45% até 2030, da neutralidade do carbono até 2050, e reafirmar novos compromissos para atingir o objetivo do acordo de Paris de limitar o aumento da temperatura média global a 1,5 ° C, visto que um estudo do Climate Action Target publicado durante a cúpula anunciou que, se dependermos das metas de curto prazo apresentadas, a temperatura da Terra irá aumentar cerca de 2,4° (United Nations, 2021).

No mundo acadêmico, o concreto permeável é amplamente reconhecido como uma tecnologia de baixo impacto (LID) para a gestão de água pluvial. (Matos *et al*, 2019; Singh *et al*, 2020). Ele é visto como uma solução que pode ajudar a mitigar os impactos negativos da urbanização e reduzir o escoamento superficial, além de melhorar a qualidade da água e a saúde do solo (Sehgal et al., 2018). Além disso, estudos destacam a capacidade do concreto permeável de filtrar e reter partículas poluentes, melhorar a qualidade água e ajudar na recarga de aquíferos subterrâneos (Lamb, 2014; Batezini, 2019). Sambito *et al* (2021), por exemplo, observou que o uso de CPER pode melhorar a microclimatologia local, aumentando a evapotranspiração e reduzindo a temperatura do ar.

No entanto, também há algumas preocupações e desafios associados ao uso de concreto permeável como uma tecnologia LID. Alguns estudos apontam para a necessidade de mais pesquisas para avaliar a performance a longo prazo, o potencial de manutenção e o impacto na segurança rodoviária (Ferreira, 2018; Li et al, 2017).

A utilização de agregados reciclados em projetos de concreto permeável é uma estratégia importante para atingir a sustentabilidade ambiental. Além de reutilizar materiais já disponíveis, a utilização de agregados reciclados permite reduzir a extração de agregados naturais, melhorar a qualidade do ar e do solo, e contribuir para a gestão adequada de resíduos (Xie et al, 2018). Em conformidade com a preocupação global com a sustentabilidade, a utilização de agregados reciclados em projetos de concreto permeável tem sido objeto de estudo em todo o mundo (Yang, 2022; Xu et al, 2022).

O uso de agregados reciclados em concreto permeável pode unir tecnologia LID e sustentabilidade na gestão de água pluvial. No entanto, há incertezas sobre a performance a longo prazo e são necessárias pesquisas para garantir a conformidade com as especificações técnicas (Wu et al, 2022; Lei et al, 2020).

Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência do agregado reciclado na produção de concretos permeáveis, com ênfase nas propriedades de hidráulicas e mecânicas.

1.2 JUSTIFICATIVA

A influência dos agregados reciclados no comportamento do concreto permeável é um tema relevante e atual (Tavares e Kasmierzack, 2016) que pode trazer contribuições significativas para a área de construção civil e meio ambiente. A sustentabilidade é uma das maiores preocupações da sociedade atual, e uma das maneiras de promovê-la é através do uso de materiais reciclados (Välimäki et al, 2020). O uso de agregados reciclados pode reduzir significativamente a extração de recursos naturais, a quantidade de resíduos gerados e as emissões de gases de efeito estufa associados ao transporte de materiais virgens (Yu, Huang e Ding, 2019).

A utilização de ARC faz parte da economia circular, que busca minimizar o desperdício e otimizar o uso de recursos. Em vez de serem descartados, são reintroduzidos na cadeia produtiva, dando-lhes uma segunda vida útil. Ao incorporar materiais reciclados em projetos de construção, apoia-se o ciclo de vida dos materiais, promovendo a sustentabilidade e reduzindo a necessidade de novas extrações (Benachio et al, 2020).

A Economia Circular (EC) também oferece uma oportunidade significativa para as empresas repensarem suas práticas e irem além da preocupação com suas pegadas ecológicas e eficiência energética. Ela propõe uma transição para um sistema em que o valor dos produtos, materiais e recursos seja mantido na economia pelo maior tempo possível, com a menor geração de resíduos. Isso abre caminho para a criação de novas formas de inovação e desenvolvimento local. Portanto, a EC representa uma mudança importante que as empresas podem abraçar, impulsionando uma abordagem mais sustentável e responsável em relação aos recursos e ao ciclo de vida dos produtos (Oliveira e França 2019, EUROPEAN COMMISSION, 2015).

Estudos realizados por Mikami, Kumer and Döll (2020); Yap et al (2018) e Strieder et al (2022) compararam o desempenho do concreto permeável feito com agregados reciclados e agregados naturais. Os resultados indicaram, em ambos os estudos, que não houve diferença significativa na tração na flexão, resistência à compressão e na permeabilidade entre os dois tipos de concreto permeável, indicando que o uso de agregados reciclados pode ser uma alternativa viável aos agregados naturais.

Apesar das vantagens da utilização de agregados reciclados no concreto permeável, é importante enfatizar a importância de garantir que esses materiais sejam devidamente processados e de boa qualidade, para garantir a durabilidade do concreto. A seleção de fornecedores confiáveis de agregados reciclados também é crucial para garantir que o material atenda às normas e regulamentações necessárias (Tam, Soomro e Evangelista, 2021).

Buttler (2003) desenvolveu um estudo referente a influência do período de moldagem e da reciclagem do concreto nas propriedades do agregado de concreto reciclado, onde os resíduos reciclados logo após sua geração possuem maior contribuição nas propriedades mecânicas do concreto, devido a existência de grandes quantidades de partículas não-hidratadas de cimento, onde os concretos produzidos com esses agregados reciclados tiveram resultados superiores na resistência a tração e compressão.

Outros trabalhos como o de Salles et al (2021) e Srubar (2015) destacam a importância de considerar a qualidade dos agregados reciclados em relação à presença de contaminantes como materiais orgânicos, metais pesados e outros

elementos nocivos à saúde e ao meio ambiente.

Referente a custos, materiais recicláveis proporcionam benefícios financeiros significativos. Os custos de aquisição de agregados reciclados são mais baixos, uma vez que são provenientes de materiais reciclados disponíveis localmente, o que contribui para a economia global do projeto, visto que agregados naturais demandam energia para extração, processamento e transporte de materiais (Nilimaa, 2023).

Em resumo, é importante que sejam realizados estudos locais para avaliar a viabilidade e qualidade dos agregados reciclados em cada região, a fim de garantir a aplicação adequada do material em diferentes locais. Isso pode contribuir para a promoção da sustentabilidade na construção civil, redução de custos e preservação de recursos naturais.

1.3 QUESTÃO DA PESQUISA

É possível atender os parâmetros normativos do concreto permeável usando agregado reciclado de concreto?

1.4 HIPÓTESE DA PESQUISA

Supõe-se que a substituição de seixo por agregado reciclado em porcentagens adequadas não afetará o comportamento físico-mecânico do concreto permeável.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Geral

- Esta pesquisa busca investigar como a adição de agregado reciclado impacta as propriedades físicas e mecânicas do concreto permeável, considerando aspectos como resistência, permeabilidade e durabilidade do material.

1.5.2 Específicos

- Quantificar o efeito do percentual de substituição dos agregados no concreto na capacidade hídrica e mecânica do concreto;
- Analisar se as propriedades físicas do agregado de RCC afeta nas resistências mecânicas do concreto;

- Verificar se os concretos permeáveis irão atender aos requisitos normativos das propriedades mecânicas e hidráulicas.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta pesquisa está dividida em cinco capítulos, além das referências e sugestões para trabalho futuro. Estes seguem a seguinte sequência:

O primeiro aborda a introdução, pontuando a contextualização e justificativa da pesquisa, além dos objetivos gerais e específicos, bem como hipóteses e questões de pesquisa também são apresentados.

O segundo capítulo se refere a revisão bibliográfica do tema, desde a história do concreto permeável e suas características, sua composição, porosidade e permeabilidade, propriedades mecânicas e hidráulicas, a explanação do método de De Larrard e o método de dosagem escolhido para a construção do concreto permeável. O capítulo também aborda o agregado natural e o agregado reciclado, apresentando suas características e alguns trabalhos referentes ao agregado reciclado.

O terceiro capítulo aborda o programa experimental, os materiais utilizados, os fatores fixos e controláveis, os ensaios normativos e a descrição do método de dosagem de Castro. O quarto capítulo apresenta e discute a análise de resultados dos ensaios hidráulicos e mecânicos. O quinto capítulo aborda as conclusões da pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONCRETO PERMEÁVEL

Segundo a NBR 16416 (ABNT, 2015), o concreto permeável (CPER) é definido como um material utilizado em camadas de pavimentação, que possui vazios interligados em arranjo estrutural, que permitem a percolação da água por gravidade ou acúmulo temporário de água, reduzindo o fluxo superficial sem danificar sua estrutura. A tecnologia é caracterizada pela composição básica de água, agregados graúdos, com ou sem presença de finos, e com ou sem a adição de adições minerais e aditivos para otimizar as propriedades reológicas de materiais.

De acordo com Kia, Wong e Cheeseman (2017) e Hashim et al (2022), o concreto permeável tem sido uma solução cada vez mais utilizada na gestão da drenagem de águas pluviais em projetos de construção civil. O estudo destaca que o concreto permeável tem se mostrado eficiente na prevenção de enchentes e na proteção do meio ambiente, pois contribui para a recarga dos aquíferos subterrâneos e evita a poluição da água.

Shafique, Kim e Kyung-Ho (2018), e Sartip e Sartip (2019) apontam que o uso de concreto permeável em calçadas, estacionamentos, pátios e outras superfícies impermeáveis pode ajudar a absorver até 90% da água da chuva, minimizando o impacto da urbanização sobre os sistemas de drenagem. O artigo destaca também que este tipo de concreto tem se mostrado durável e resistente às intempéries, com menor necessidade de manutenção em comparação a outros tipos de revestimentos impermeáveis.

Liu, Jia e Niu (2017) argumentam que o concreto permeável é uma alternativa sustentável e econômica para os desafios da gestão da drenagem urbana. Ele ajuda a preservar a qualidade da água e a mitigar os efeitos das enchentes, e pode ser combinado com outras tecnologias, como sistemas de armazenamento de água da chuva e filtros vegetais, para formar soluções integradas de gestão de águas pluviais. Os pesquisadores concluem que a escolha pelo concreto permeável permite às cidades promover a resiliência climática e garantir uma gestão mais eficiente e responsável da água.

A utilização de pavimentos permeáveis apresenta outras vantagens significativas em longo prazo, apesar de possuir custos iniciais maiores de implantação em comparação aos concretos tradicionais. Dentre essas vantagens, destaca-se a capacidade de purificar e armazenar água da chuva para diversos fins, como mencionado por Hu et al (2018). Além disso, a permeabilidade do pavimento contribui para a alimentação dos aquíferos, redução da formação de ilhas de calor e aumento da segurança viária devido à inexistência do filme de água na superfície da estrada, como indicado por Fini et al (2022); e Liu, Li e Yu (2020).

A percolação da água em pavimentos permeáveis também favorece o crescimento de árvores e plantas em ambientes urbanos pavimentados, como

mencionado por Fini et al (2022), contribuindo para a melhoria da biodiversidade e da qualidade de vida da população. Portanto, a utilização de pavimentos permeáveis é uma solução sustentável e eficaz para a gestão de águas pluviais e a mitigação dos impactos ambientais em ambientes urbanos.

2.2 ASPECTOS NORMATIVOS DO CONCRETO PERMEÁVEL

É importante garantir que o concreto permeável atenda aos requisitos técnicos e normativos adequados para garantir sua eficiência, segurança e durabilidade. Os parâmetros normativos para avaliar o concreto permeável incluem principalmente: permeabilidade, tração na flexão e resistência à compressão (Junior, 2019).

2.2.1 Permeabilidade

A permeabilidade do concreto permeável pode ser avaliada através das normas técnicas das organizações como ABNT NBR 16416:2015 – Pavimentos Permeáveis – Requisitos e Procedimentos, do ACI 522R-10 "Report on Pervious Concrete" e do ASTM C1701 "Standard Test Method for Infiltration Rate of in Place Pervious Concrete", sendo um dos principais parâmetros normativos para avaliar o concreto permeável, pois é através da permeabilidade que a pavimentação permite a infiltração de água pluvial, contribuindo para a preservação dos recursos hídricos e a redução do risco de enchentes.

Essas normas abordam diferentes aspectos relacionados a pavimentos permeáveis, desde a especificação e dimensionamento até a medição da capacidade de infiltração em condições reais. Elas são importantes para garantir a qualidade e desempenho desses materiais e promover sua utilização como uma solução sustentável para o manejo de águas pluviais.

A ABNT NBR 16416:2015 estabelece a quantificação da permeabilidade a partir do coeficiente de permeabilidade k , cujo é um parâmetro que mensura a velocidade que a água percola a placa permeável, com valor maior que 1mm/s. A norma tem como objetivo promover o uso de pavimentos permeáveis como uma solução para o manejo sustentável de águas pluviais, permitindo a infiltração da água no solo e reduzindo o risco de enchentes.

O ACI 522R-10 é um guia técnico que fornece informações sobre o uso do concreto poroso em pavimentos e outras aplicações. O relatório aborda a definição de concreto poroso, materiais utilizados, propriedades mecânicas, dimensionamento e detalhes de execução, além de apresentar casos de estudo e práticas recomendadas. Já o ASTM C1701 é um método padronizado para medir a taxa de infiltração de água em concreto poroso in situ. O teste é realizado para avaliar a capacidade de infiltração do concreto poroso em condições reais, simulando a ação da chuva.

Vários estudos científicos recentes têm se concentrado na avaliação da permeabilidade do concreto permeável. De acordo com o Wang et al. (2020), os autores avaliaram a permeabilidade e as propriedades mecânicas de concreto permeável com agregados naturais, com resultados que mostraram que o uso de agregados naturais pode melhorar a permeabilidade de concreto permeável sem prejudicar significativamente suas propriedades mecânicas. Maines et al (2022) avaliou o efeito da granulometria do agregado natural na permeabilidade de concreto permeável, onde a dimensão do agregado natural tem um impacto significativo na permeabilidade do concreto permeável. Ao aumentar a dimensão média dos agregados ocorre um aumento de volume de vazios, maior permeabilidade, porém, com redução de resistência do concreto, ou seja, maior índice de vazios resultando em menor resistência mecânica.

Os trabalhos científicos mencionados têm uma conclusão comum: que o tipo, tamanho e quantidade de agregado natural usado afetam significativamente a permeabilidade do concreto permeável, sugerindo que a escolha adequada dos agregados naturais pode ser crucial para maximizar a permeabilidade do concreto permeável e, assim, atingir seus objetivos de drenagem de água da chuva. Ademais, é necessária a investigação adicional para compreender ainda mais o impacto dos agregados naturais na permeabilidade do concreto permeável.

Referentes a pesquisas de permeabilidade em concretos permeáveis com agregado reciclado, trabalhos como de Cominato et al (2022), Wu et al (2022), Lei et al (2022), possuem conclusão comum, onde o uso de agregados reciclados pode ter um impacto positivo na permeabilidade do concreto permeável, mas isso depende do tipo, da quantidade de agregado reciclado e do controle de qualidade. É necessário investigar mais a fim de compreender melhor o impacto dos agregados reciclados na

permeabilidade do concreto permeável.

Assim como nas pesquisas com agregado natural, esses trabalhos sugerem que é importante considerar fatores como a qualidade dos agregados reciclados e suas propriedades para garantir que a permeabilidade do concreto permeável seja eficiente e satisfatória, principalmente pela grande variabilidade de agregados reciclados devido sua composição.

2.2.2 Resistência a tração na flexão

Esse parâmetro mecânico é medido através da ABNT NBR 12142: 2010 – Concreto - Determinação da resistência a tração na flexão; e ASTM C1609/C1609M-18 - Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (2019).

A ABNT NBR 12142 aborda a tração na flexão como uma das propriedades mecânicas a serem avaliadas no ensaio de flexão por meio do módulo de ruptura. No entanto, é importante lembrar que a ABNT NBR 12142:2010 não foi elaborada especificamente para o ensaio de corpos de prova de concreto permeável, e sim para o concreto convencional. Por isso, é necessário tomar alguns cuidados e adaptar a norma para a realidade do concreto permeável, levando em conta as suas particularidades e propriedades mecânicas.

A ASTM C1609/C1609M-18 um método padronizado para avaliar a resistência à flexão do concreto reforçado com fibras. O ensaio é realizado por meio de um teste de flexão em viga com carga aplicada em três pontos, e tem como objetivo determinar a capacidade do material de resistir à flexão em condições de serviço.

Silva, de Brito e Dhir (2015) estudaram o desempenho na flexão e as propriedades materiais do concreto permeável com agregado reciclado. Foram realizados ensaios de tração na flexão e os resultados indicaram que, independentemente do nível de substituição, tipo e qualidade do agregado reciclado utilizado, o concreto reciclado resultante tende a apresentar uma relação semelhante à do concreto agregado natural correspondente.

Zhu, Wen e Tian (2022) investigaram o efeito do tamanho do agregado e a influência da adição de fibras de polipropileno na resistência mecânica do concreto poroso, onde os ensaios de tração na flexão indicaram que a resistência à flexão

aumenta com a diminuição do tamanho do agregado, bem como a adição de fibras aumentou significativamente a resistência à flexão do concreto poroso.

2.2.3 Resistência a compressão

Já a resistência à compressão é uma medida importante da capacidade do concreto de suportar cargas comprimidas e é fundamental para garantir a estabilidade e segurança da pavimentação permeável. Temos como normas para sua avaliação a ABNT NBR 9781:2013 - Peças de concreto para pavimentação: especificação e métodos de ensaio; e ASTM C39 – Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens e a ACI 318 – Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary.

Embora essas normas não abordem especificamente a compressão no concreto permeável, elas são relevantes para a avaliação da resistência à compressão desse tipo de concreto, pois os procedimentos e critérios estabelecidos podem ser aplicados a ele. A norma ABNT NBR 9781:2013 estabelece os requisitos mínimos de resistência para as peças de concreto destinadas à pavimentação, que devem ser determinados a partir de ensaios de resistência à compressão em corpos de prova cilíndricos. A ASTM C39 é uma norma internacionalmente reconhecida que especifica o método de ensaio para determinação da resistência à compressão do concreto, utilizando corpos de prova cilíndricos moldados. A ACI 318 é um código de construção que estabelece as exigências de projeto e construção de estruturas de concreto armado e pré-moldado.

Dai et al (2019) investigaram o desempenho de pavimentos permeáveis quanto à resistência à compressão, onde das conclusões gerais obtidas, o tamanho do agregado graúdo tem uma grande influência sobre as propriedades mecânicas do concreto permeável.

Yazici e Mardani-Aghabaglou (2017) analisaram o efeito da distribuição granulométrica do agregado e da relação água/cimento (a/c) sobre as propriedades mecânicas do concreto permeável, com resultados onde a resistência e a permeabilidade aumentaram com a utilização de 20 % em peso de agregado miúdo em vez de agregado graúdo e com a redução do diâmetro dos grãos do agregado graúdo, embora a relação a/c das misturas aumente de 0,3 para 0,35.

Os trabalhos citados sugerem que a escolha adequada do agregado, o tamanho e o tipo de agregado, podem ter um impacto significativo na resistência à compressão do concreto permeável.

Tabela 1 - Valores normativos para os parâmetros de acordo com cada instituição

Parâmetro normativo	ABNT		ASTM		ACI	
Permeabilidade	NBR 16416:2015	> 1mm/s	ASTM C1701	-	ACI 5225-10	1,4mm/s a 12,2 mm/s
Resistência a tração na flexão	NBR 12142:2010	> 2 MPa	ASTM C1609/C1609M-18	-	-	-
Resistência a compressão	NBR 9781:2013	> 20 MPa	ASTM C39	> 13 MPa	ACI 318	-

Fonte: Autora (2024)

2.3 EFEITO DO TIPO E GRANULOMETRIA DO AGREGADO NO CONCRETO PERMEÁVEL

A granulometria afeta as propriedades do concreto endurecido, sendo o agregado o principal responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do concreto Angelin et al (2018). Segundo a ACI 522R-10 (2010), uma boa distribuição granulométrica contribui para propriedades ótimas na matriz do concreto, com adoção de misturas binárias em que o agregado de maior diâmetro não seja maior que 2,5 vezes que o agregado de menor dimensão, a fim de que não ocorra obstrução, por parte do agregado de menor granulometria, dos poros originados entre os agregados maiores, prejudicando a passagem de água no concreto.

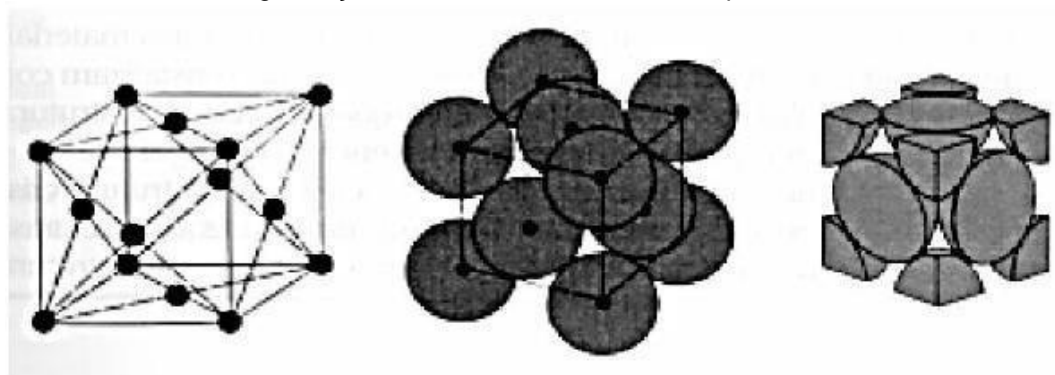
A ACI 522R-10 (2010) também recomenda o uso de agregados de granulometria única ou que estejam entre graduações de 9,5 mm e 19 mm de diâmetro, e propõe restrições ao uso de agregados finos, para não prejudicar a conectividade dos poros na matriz. Já a ASTM C33 recomenda que o tamanho dos agregados usados na produção concreto permeável varie em intervalos de peneira N° 67 (4,75 – 19,0 mm), N° 8 (2,36 – 8,5 mm) e N° 89 (1,18 – 9,5 mm). Tennis et al.,

(2004) citam as faixas granulométricas de 19,0-4,75 mm, 9,5-2,36 mm e 9,5-1,18 mm; Chandrappa e Biligiri (2016) apontaram as faixas de 19-9,5 mm e 9,5-2,36 mm; enquanto Castro et al. (2009) em seus estudos ratificam as faixas 9,5-2,36 mm.

Baseado em seus estudos, De Larrard (1999) propôs que é possível obter um arranjo ótimo dos agregados com melhor compacidade, a fim de alcançar o melhor empacotamento dos grãos para a produção do concreto que se deseja. O método do empacotamento compressível é uma proposta de modelagem matemática baseada na definição de uma curva granulométrica ideal, utilizado para obter a melhor compacidade dos agregados, a partir da comparação entre o empacotamento virtual, sendo o arranjo geométrico ideal, e o empacotamento real, mensurado com dados experimentais.

O MEC pode ajudar a selecionar a melhor combinação de agregados reciclados e naturais, levando em conta suas características físicas e químicas, a fim de obter o máximo grau de empacotamento e, conseqüentemente, a maior densidade possível da mistura, com o objetivo de melhorar a eficiência do material em filtrar água e permitir a sua infiltração no solo.

Figura 1 - Exemplo de agrupamento em esferas de mesmo diâmetro, semelhante à organização de estruturas cristalinas do tipo CFC.



Fonte: Silva, 2004

Diversos autores colaboraram para que se obtenha as melhores escolhas de agregados para composição do concreto poroso: Meddah et al. (2017) afirmam que a escolha da granulometria é o principal influente na resistência e porosidade da matriz do concreto; Ćosić et al. (2015) declaram que diâmetro reduzido confere maior densidade e resistência a tração na flexão; Chandrappa and Biligiri (2016) obtiveram

resultados de que as maiores resistências são alcançadas pela proporção ótima entre agregados graúdos e pasta de cimento; enquanto Tennis et. al (2004) relatam que o material está mais suscetível ao desgaste superficial por atrito com outras coberturas devido a superfície rugosa da matriz, sendo relevante realizar ensaios de desgaste a abrasão superficial do material para uma escolha assertiva.

Ainda citando Tennis et. al (2004), os mesmos citam que a obtenção de maiores resistências em concretos permeáveis também é alcançada pelo formato do agregado, priorizando formatos boleados devido ótimo agrupamento e empacotamento dos grãos. De acordo com Mulyono e Anisah (2019), o tipo de agregado utilizado tem um impacto significativo na permeabilidade do concreto permeável. Eles concluíram que agregados mais porosos, como seixo, resultam em uma permeabilidade mais elevada do que agregados menos porosos, como brita.

Cominato et al (2022) investigaram o efeito combinado do tipo de agregado e da sua granulometria na permeabilidade e propriedades mecânicas do concreto permeável. Eles concluíram que o tipo e a granulometria dos agregados têm um impacto significativo nas propriedades do concreto permeável e que a escolha adequada dos agregados pode melhorar significativamente as suas propriedades. Também estudaram o impacto do tipo e tamanho dos agregados na resistência à compressão e permeabilidade do concreto permeável, descobrindo que o tipo e o tamanho dos agregados têm um efeito importante nas propriedades do concreto permeável e que a escolha adequada dos agregados pode melhorar a resistência à compressão e a permeabilidade.

Já Mikami, Kumer and Döll (2020) destacam a importância da utilização de agregados reciclados, que podem melhorar as propriedades de permeabilidade do concreto permeável, além da colaboração sustentável. Para a permeabilidade, outros fatores intrínsecos estão contidos para sua otimização como tamanho dos poros, conectividade (ou tortuosidade) e distribuição dos poros, onde o tamanho do agregado graúdo é fator determinante no tamanho do poro (Coelho e Rocha, 2019).

Em resumo, o tipo de agregado e a sua granulometria são fatores críticos na determinação das propriedades do concreto permeável e, por isso, devem ser considerados cuidadosamente durante o projeto e a produção desse tipo de material.

2.4 EFEITOS DOS LIGANTES E MATERIAIS CIMENTÍCIOS SUPLEMENTARES NO COMPORTAMENTO DO CONCRETO PERMEÁVEL

A porosidade do concreto permeável pode ser afetada pelos materiais cimentícios utilizados em sua composição. Os cimentos com menores teores de clínquer, como os cimentos alternativos ou com baixa emissão de carbono, normalmente contêm uma proporção maior de materiais pozzolânicos, como a escória de alto-forno, a cinza volante ou a pozzolana em sua composição. Esses materiais são adicionados ao cimento Portland para melhorar suas propriedades e reduzir sua pegada de carbono (Witkowski e Koniorczyk, 2020). Estudos sugerem que a utilização de cimentos com menor teor de clínquer pode melhorar a porosidade do concreto e, conseqüentemente, sua permeabilidade, devido a presença de materiais pozzolânicos adicionados na sua composição (Abrão, 2018).

Madrid, García e Borges (2016) por exemplo, cita que a adição de materiais pozzolânicos, como a escória de alto-forno e a cinza volante, pode reduzir a porosidade do concreto, melhorando sua durabilidade e resistência à compressão. Além disso, esses materiais também podem melhorar a permeabilidade do concreto, como afirmado por Mehta e Monteiro (2013).

Os materiais pozzolânicos reagem com os compostos hidratados do cimento, como o hidróxido de cálcio, formando novos compostos cimentícios que preenchem os poros do concreto. Isso reduz a porosidade do concreto, melhorando sua resistência e durabilidade. Além disso, os materiais pozzolânicos também têm a capacidade de reagir com íons de cálcio e alumínio presentes na solução do concreto, formando novos compostos cimentícios que podem preencher os espaços vazios entre os agregados do concreto, reduzindo ainda mais a porosidade e melhorando a permeabilidade (Amaral, Macioski e Medeiros, 2021).

Adições também podem melhorar a distribuição do tamanho dos poros, tornando-os mais uniformes, o que resulta em uma redução na quantidade de poros maiores e uma maior quantidade de poros menores e interconectados, permitindo uma maior penetração da água e uma melhor drenagem do excesso de água (Mehta e Monteiro, 2014).

Outra pesquisa realizada por Correa (2020) demonstrou que a adição de pozolanas, como a pozolana natural e a cinza volante, pode melhorar a resistência à compressão e à tração do concreto, bem como sua durabilidade e resistência à penetração de cloretos.

No entanto existe a possibilidade de bloqueio dos poros do concreto permeável pelo cimento e pelos materiais suplementares, o que pode afetar a permeabilidade e o desempenho do concreto. Segundo Diniz (2018), a adição de metacaulim ao concreto permeável pode resultar em uma maior obstrução dos poros devido à formação de um gel de metacaulim que pode preencher os poros.

Dessa forma é importante lembrar que a escolha dos materiais cimentícios suplementares deve ser cuidadosa, levando em consideração as condições ambientais, as propriedades do concreto e as exigências do projeto. Lembrando sempre que, para o concreto permeável possuir baixa porosidade e alta permeabilidade, além de outras características positivas, é necessário envolver uma abordagem cuidadosa e integrada que leva em conta vários fatores, incluindo a escolha dos materiais, dosagem, mistura, cura, drenagem e manutenção.

Um efeito indesejável que pode ocorrer na produção do concreto poroso é o efeito parede, fenômeno que ocorre durante a compactação do concreto, no qual as partículas de agregado se acumulam ao longo das paredes do molde, deixando a região central com menor quantidade de agregado e maior concentração de pasta de cimento, deixando-o mais denso. Isso pode resultar em uma diminuição da porosidade nessa região, o que pode afetar a permeabilidade do concreto (Braga, 2019).

Esse efeito ocorre porque as partículas de agregado são mais pesadas do que a pasta de cimento, e durante a compactação, elas tendem a se mover em direção às paredes do molde devido à fricção entre as partículas de agregado e as paredes do molde. Como resultado, a pasta de cimento é empurrada para o centro, deixando a região próxima às paredes com maior quantidade de agregado e menor quantidade de pasta de cimento. Para minimizar o efeito parede no concreto permeável, é importante utilizar uma técnica de compactação adequada, que permita uma distribuição uniforme do agregado em toda a massa de concreto (Santos, 2020).

O uso de aditivos na produção de concreto permeável é uma técnica que pode melhorar as propriedades desse tipo de concreto. Mikami (2022) afirma que o emprego de aditivos superplastificantes é uma prática comum na produção de concretos permeáveis com objetivo de ajustar a consistência da pasta de cimento ou possibilitar a redução da relação água/cimento.

O trabalho de Silva et al (2020) mostra que houve incremento nas propriedades de resistência mecânica ao utilizar-se o aditivo superplastificante no concreto permeável lançado livremente, sem adensamento, em comparação ao mesmo concreto sem aditivos. Silva e Leal (2018) em trabalho na UFPA, avaliaram o efeito dos aditivos na auto compactação do concreto poroso, utilizando seixo rolado de diâmetro compreendido entre 9,5 e 12,5 mm, concluindo que houve aumento da resistência à compressão simples e tração direta devido a redução da zona de transição na pasta de cimento pela introdução do aditivo. É importante escolher o aditivo adequado para o tipo de concreto permeável que se deseja produzir e seguir as recomendações do fabricante quanto à dosagem e modo de aplicação.

No concreto permeável produzido com agregados reciclados, os ligantes desempenham um papel fundamental na aderência entre o agregado e a matriz de cimento, bem como na resistência mecânica e na durabilidade do material. Isso se deve ao fato de que os agregados reciclados podem conter impurezas ou revestimentos que prejudicam a aderência com a matriz de cimento, resultando em um concreto de baixa resistência (Lemanska, 2019).

Segundo a pesquisa de Mendivil et al (2017), a adição de ligantes químicos (aditivos e adições minerais) pode melhorar a aderência entre o agregado reciclado e a matriz de cimento, resultando em um aumento da resistência mecânica do concreto permeável. Além disso, esses ligantes químicos podem ajudar a reduzir a porosidade do concreto, melhorando assim a sua durabilidade e resistência à penetração de água e outros fluidos.

Outras pesquisas, como a de Andrade, Silva e Bárbara (2019), também apontam para a importância da adição de ligantes pozolânicos, como a cinza volante e a sílica ativa, na produção de concreto permeável com agregados reciclados. Esses materiais podem melhorar a resistência à compressão e à tração do concreto, bem

como a sua resistência à corrosão e ao ataque químico. A escolha do ligante adequado deve ser feita com base nas características específicas do agregado reciclado e nas propriedades desejadas para o concreto permeável final.

Segundo Hager et al (2019), avaliou-se o efeito do tipo de cimento na resistência mecânica e permeabilidade de concretos permeáveis produzidos com agregados reciclados. O tipo de cimento influenciou a resistência à compressão e a permeabilidade do concreto de 90 dias, onde concretos com cimento com escória apresentaram menor permeabilidade e maior resistência à compressão.

2.5 MÉTODOS DE DOSAGEM PARA O CONCRETO PERMEÁVEL

O concreto permeável é um tipo de concreto poroso e por isso é comum referir-se a ele como "concreto seco", pois a sua consistência é diferente da do concreto convencional, que é mais pastoso. Segundo a norma brasileira NBR 16416, que estabelece os requisitos e procedimentos para produção de concreto permeável, a relação água/cimento no traço do concreto permeável não deve ser superior a 0,35, o que pode tornar o concreto mais seco em comparação com o convencional.

Com relação aos traços usuais de concreto permeável, é comum utilizar a dosagem em massa, o que significa que os componentes do concreto são medidos em função do peso, e não do volume. Isso ocorre porque a produção de concreto permeável requer uma maior precisão na dosagem dos materiais, principalmente em relação à quantidade de água utilizada no traço, para garantir a porosidade adequada. De acordo com o estudo de Braga (2019), a dosagem em massa é mais eficiente na obtenção da porosidade desejada do que a dosagem em volume.

O concreto poroso também é considerado um concreto "rico", uma vez que sua dosagem contém uma quantidade maior de cimento do que o concreto convencional. Isso se deve à necessidade de obter uma maior resistência do concreto para suportar a pressão da água e evitar o entupimento dos poros. De acordo com Santos (2020), o aumento da quantidade de cimento no traço pode melhorar a resistência do concreto, mas deve ser cuidadosamente dosado para evitar problemas como a fissuração e impacto na porosidade e permeabilidade do concreto.

Referente relação água/cimento, Santos (2020) afirma que o valor adotado precisa garantir resistência mecânica suficiente para que o CPER atinja boas propriedades mecânicas, não deixando a mistura de concreto seca, na qual dificulta a moldagem de elementos estruturais, adotando dessa forma uma relação a/c que resulte em uma boa ligação da pasta de cimento com os grãos de agregado.

ACI (2010) aconselha empregar relações água/cimento entre 0,26 a 0,40, onde valores de a/c fora destes limites podem resultar em drenagem de pasta de cimento em direção a região inferior do elemento de concreto, colaborando para o entupimento dos poros do CPER, situação que influencia negativamente a permeabilidade. Castro (2009) aponta em seu trabalho que, o valor mínimo de relação água/cimento deve ser de 0,32, garantindo até este limite os parâmetros de permeabilidade e resistência mecânica.

Ribeiro e Silva (2018) realizaram um estudo na UFPA referente à influência da relação água/cimento nas propriedades mecânicas e hidráulicas do concreto permeável, utilizando como agregado o seixo rolado com faixas granulométricas de 9.5mm - 4.76 mm e 4,76 mm - 2.38 mm e relação água/cimento de 0,31 a 0,39, concluindo que, a relação a/c 0,37 apresentou a mistura de concreto os resultados mais satisfatórios referentes à resistência mecânica e permeabilidade.

A ACI 522R-10 (2010) estabelece que o cálculo do consumo de cimento possui o intuito de estabelecer o volume mínimo de pasta para cobrir a superfície dos agregados graúdos e garantindo a união entre as partículas, com a intenção de propor trabalhabilidade, resistência e porcentagem mínima de vazios conectados classificando o concreto como permeável.

Alguns estudos realizados apresentam intervalos de consumo apropriados para uma boa dosagem, como de Tennis et al. (2004) e ACI 522R-10 (2010) com consumo de materiais cimentícios variando entre 270 e 415 kg/m³; Chandrappa e Biligiri (2016) em sua pesquisa indicando consumo de cimento entre 150 a 495kg/m³, e Castro (2009) com variação entre 282 e 358 kg/m³. No estudo realizado por Ribeiro e Silva (2018) na UFPA, o consumo de cimento obtido de 351,06 (Kg/m³) constava dentro dos intervalos encontrados nos trabalhos citados.

A dosagem ótima para o concreto permeável ocorre com o equilíbrio entre vazios, resistência mecânica e trabalhabilidade (ACI, 2010). Ao unir as partículas de agregado, a pasta de cimento produzida cria um sistema de vazios interconectados que assegura alta permeabilidade ao material. Devido à baixa quantidade de pasta de cimento para a produção do concreto permeável, no estado fresco pelo slump test (normatizado pela NBR 67) ele apresenta abatimento baixo ou quase nulo (Bigotto, 2021).

Há, na literatura, algumas metodologias de dosagem de pavimentos permeáveis de concreto, sendo um desses métodos o proposto por Castro et al. (2009). Esta metodologia de dosagem requer, inicialmente, dados de entrada para as formulações do autor como os dados da caracterização do agregado usado na mistura, com os valores de massa específica e da massa unitária dos grãos de agregado auxiliando na determinação do volume de vazios, e o fator de compactação (FC), sendo a influência dessas variáveis na formulação um dos motivos para a escolha dessa metodologia, que vem sendo utilizada em várias pesquisas na Universidade Federal do Pará (UFPA):

$$Cc (kg) = \left[\frac{(10Va - 1000)FC + 965,48 - 11,14Vr}{\left(\frac{1}{\gamma_c} + \left(\frac{w}{c}\right) + \frac{Dad}{100\gamma_{ad}}\right)FC} \right] \quad (\text{Equação 2.5.})$$

Conforme equação acima temos:

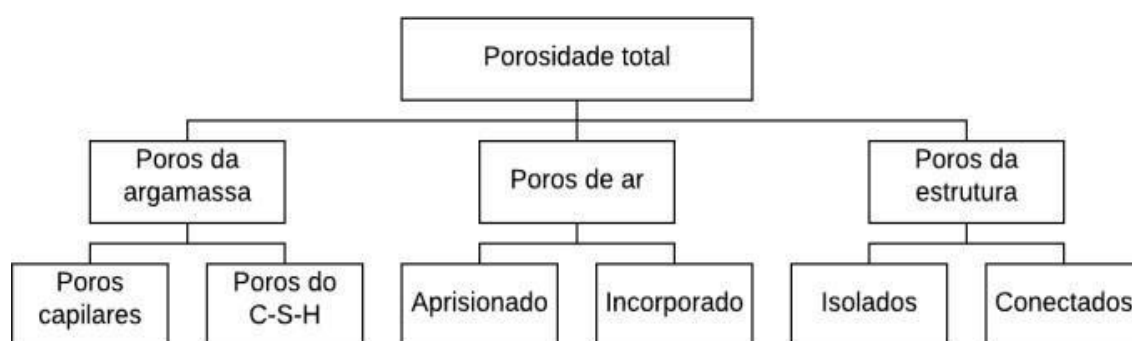
- Cc é o consumo de cimento em kg;
- Va é o volume de compactação; ou seja, a porcentagem de vazios inicial, considerando somente os vazios no volume de agregado graúdo;
- FC é o fator de compactação, fixado em 0,95. Segundo Castro et al. (2009), o fator de compactação pode variar entre 0,84 e 0,99, e depende principalmente da razão água/cimento, devendo ser, portanto, recalculado após a realização dos ensaios;
- Vr é a porcentagem teórica de vazios;
- γ_c é a massa específica do cimento;
- γ_{ad} é a massa específica do aditivo (no desenvolvimento dos traços, não foi utilizado nenhum tipo de aditivo);
- w/c é a razão água/cimento;
- Dad é a dosagem do aditivo expressa como porcentagem do peso do cimento.

O volume de vazios obtido pressupõe que 100% da quantidade de vazios do concreto permeável estarão conectados e permitirão a percolação de líquidos através de placas ou peças feitas com este material. No entanto, é importante ressaltar que na realidade não é o que ocorre, pois, o conjunto de vazios interligados não está totalmente conectado, visto que a pasta de cimento pode se acumular entre os grãos, em algumas regiões da estrutura. A partir da metodologia de Castro et al. (2009), é possível obter a quantidade de aglomerante necessária para alcançar a quantidade de vazios conectados e, obtendo o consumo de cimento pela fórmula, determina-se a proporção de materiais para a produção de um metro cúbico de concreto permeável (Santos, 2020).

2.6 INTERCONNECTIVIDADE DAS MISTURAS COM CONCRETO PERMEÁVEL

A porosidade total é um dos principais parâmetros que interferem nas propriedades hidráulicas e mecânicas do concreto permeável, com faixa de porosidade ótima que deve variar entre 15% e 35% (Kia, Wong e Cheeseman (2017). Embora a porosidade seja uma propriedade fortemente mencionada em pesquisas de concreto poroso, ainda existem divergências referentes à sua definição. Segundo Strieder (2020), a porosidade total no interior do concreto permeável é dividida em três tipos: poros da argamassa, vazios de ar e poros da estrutura.

Figura 2 - Tipos de poros no concreto permeável



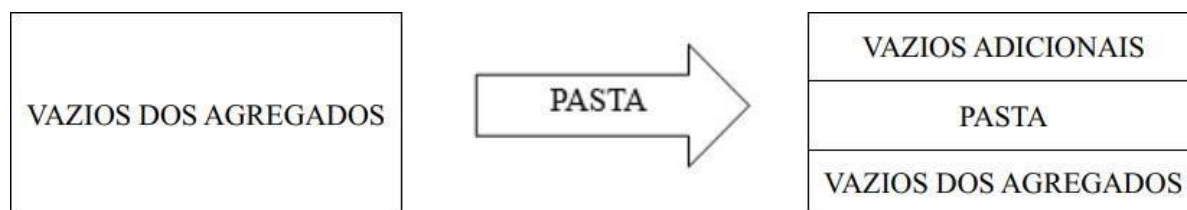
Fonte: Strieder, 2020.

Os poros da argamassa são formados durante o processo de hidratação do cimento, sendo subdivididos em poros capilares, que correspondem ao espaço não ocupado pelos produtos de hidratação, e os poros do gel, que estão dentro do silicato

de cálcio hidratado (C-S-H), ou seja, ocupam o espaço entre os produtos de hidratação. Já os poros de ar, eles podem ser de dois tipos: poros de ar aprisionados, que surgem no processo de adensamento do concreto, e os vazios de ar aprisionados, resultantes de aditivos próprios para incorporação de ar. E por último, os poros da estrutura, que podem estar isolados ou interligados outros, e estão relacionados a fatores como a ausência de pasta de cimento, características dos agregados, relação agregado/cimento e grau de compactação.

Segundo Menagatti e Rocha (2019), o concreto permeável apresenta vazios que podem não ser efetivos para escoamento de fluidos, devido à presença de poros isolados em sua estrutura interna. A porosidade efetiva é uma condição fundamental para um bom desempenho hidráulico do concreto permeável, determinada como a razão entre o volume dos poros conectados e o volume total do material. Já em relação à porosidade total, Castro et al. (2009) estabelecem que a porosidade total em concretos permeáveis é estabelecida pela relação entre os vazios iniciais dos agregados graúdos, a pasta de cimento e os vazios incorporados pela pasta conforme imagem abaixo:

Figura 3 - Vazios na matriz do concreto permeável



Fonte: Braga, 2019.

A porosidade total e efetiva no concreto permeável são afetadas por uma série de fatores como por exemplo proporção de materiais, tamanho e distribuição de agregados, tipo de agregados, processos de cura, teor de ar incorporado e tipo de aditivos (Metha e Monteiro, 2014).

Kia, Wong e Cheeseman (2017) fizeram uma revisão sobre a obstrução de concreto permeáveis, onde um problema crítico do concreto permeável é o entupimento devido ao bloqueio superficial e infiltração de partículas finas, o que causa perda de permeabilidade e degradação do desempenho. O entupimento está relacionado à alta tortuosidade dos poros formada nas formulações atuais de

concretos permeáveis. Foi observado também que a distribuição de tamanho de poros do concreto permeável também teve um papel importante na sua resistência e durabilidade.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 PLANEJAMENTO

O programa experimental foi organizado com a finalidade de analisar a influência do agregado reciclado na produção de concreto permeável com seixo, uma vez que pesquisas existentes atestam a viabilidade do uso de agregado de RCC desde que em proporções apropriada do agregado alternativo, e foram produzidas com agregados provindos de concretos produzidos com brita, apresentando dessa forma carência de trabalhos que possuam seixo no seu material reciclável.

Para que o concreto esteja dentro das normas para aplicação, foi realizado os ensaios mecânicos e hidráulicos recomendados na norma NBR 16416 (ABNT, 2015) referente a produção de pavimentos de concreto permeável. Na Figura 4, o fluxograma apresenta as etapas que foram realizadas no programa experimental.

Figura 4 – Fluxograma do programa experimental



Fonte: Autora, 2024

3.1.1 Fatores Controláveis

Para que os resultados possam ser comparados e o sistema seja uniformizado, alguns parâmetros precisam ser controlados como: tipos de agregados e porcentagem de substituição dos agregados.

- a) Agregados: Foram utilizados dois tipos de agregados: Os agregados naturais de seixo rolado e os agregados reciclados de concreto para a produção do material em estudo.
- b) Percentual de agregados nas misturas: O teor de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado foi de 0%, 50% e 100%. Esses teores foram definidos baseados em pesquisas realizadas, onde é possível substituir em até 100% do agregado natural por agregado reciclado, conservando os parâmetros normativos estabelecidos.

3.1.2 Fatores Fixos

Os fatores mencionados abaixo possuem grande influência nos resultados. Com o objetivo de uniformizar o sistema de produção das amostras de concreto permeável, fixou-se os seguintes parâmetros de acordo com resultados de trabalhos realizados na UFPA:

- a) Relação água/cimento

Baseado nas pesquisas iniciais realizadas na UFPA por Ribeiro e Silva (2018) referentes à resistência mecânica e permeabilidade recomendada na NBR 16416 (ABNT, 2015), a relação água/cimento de 0,37 foi utilizada para a produção dos concretos visto que essa relação apresentou os dados mais satisfatórios referentes aos parâmetros normativos.

- b) Período de cura

Foi adotado o período de cura de 28 dias para as placas de concreto permeável, período esse normativo e que garante uma maior hidratação do cimento a partir da condição de saturação da amostra submersa (Neville, 2016). As placas ficaram em tanque em cura submersa até a idade mencionada.

- c) Ordem de mistura

O concreto permeável será produzido em uma betoneira de eixo inclinado com capacidade de 150 litros, apresentando 40 rotações por minuto. A ordem de mistura dos materiais na betoneira seguirá as etapas adotada na pesquisa de Cordeiro et al. (2019).

3.1.3 Variáveis de resposta

De acordo com a metodologia citada, foram definidas variáveis de resposta para estabelecer quantificação das características normativas para viabilidade do concreto permeável. A tabela 3.1 mostra todas as variáveis de estudo, as referências adotadas e o indicativo da propriedade que cada parâmetro pode ser associado.

Tabela 2 – Variáveis de resposta e suas diretrizes

Variáveis de Resposta	Diretrizes	Indicador
Coesão	Tennis et al. (2004)	Aderência do conjunto pasta-agregado
Coefficiente de permeabilidade	NBR 16416 (ABNT, 2015)	Hidráulico
Porosidade efetiva e total	Kim e Lee (2010)	Físico
Densidade e Índice de vazios no estado endurecido	NBR 9778 (ABNT, 2005)	Hidráulico/mecânico
Resistência a compressão	NBR 16416 (ABNT, 2015)	Mecânico
Resistência a tração na flexão	NBR 12142 (ABNT, 2010)	Mecânico

Fonte: Autora (2024)

3.2 MATERIAIS

Para a construção das placas de concreto permeável utilizou-se aglomerante hidráulico, agregado natural e agregado graúdo reciclado de concreto, e água para o amassamento das misturas produzidas.

Nesta pesquisa utilizou-se como aglomerante hidráulico o cimento Portland CP II – F 32. A escolha baseou-se na disponibilidade comercial e na ampla utilização deste material na região metropolitana de Belém. Trata-se de um material de massa específica 3,06 g/cm³, determinado pela NBR 16605 (ABNT, 2017), início de pega de 1h50min e índice de finura de 1,78%, parâmetros determinados respectivamente pela NBR 16607 (ABNT, 2018) e NBR 11579 (ABNT 2012).

O agregado natural utilizado nesta pesquisa é um seixo de cava comercialmente disponível na região metropolitana de Belém. Trata-se de agregados graúdos extraídos de jazidas na cidade de Ourém-Pa distante uns 150 km da capital, que tem como característica um solo arenoso ou areno-argiloso, com partículas friáveis e/ou presença de materiais pulverulentos. As informações sobre este material encontram-se na tabela 3.

Com relação ao agregado alternativo, adotou-se o agregado reciclado de concreto (ARC), proveniente da fragmentação de corpos de prova de concretos de classe de resistência entre 15 e 40 MPa, gerados no laboratório de Engenharia Civil da UFPA. Este material foi cominuído em britador de mandíbulas, e separado em frações com o auxílio de um peneirador mecânico e armazenado em baldes, em local seco e protegido de intempéries.

Tabela 3 – Caracterização dos agregados

Parâmetro	Agregado natural	Agregado de RCC	Norma
Massa Específica	2,64 g/cm ³	2,61 g/cm ³	NBR 16917 (ABNT, 2021)
Massa Unitária	1,55 g/cm ³	1,25 g/cm ³	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Absorção	2,11	6,32	NBR 16917 (ABNT, 2021)
Índice de Vazios	41,34	52,2	NBR 16972 (ABNT, 2021)
Índice de Forma	1,9	2,23	NBR 7809 (ABNT, 2019)

A figura 5 mostra os dois tipos de agregados citados. Conforme o esperado, o agregado reciclado apresenta índices físicos diferentes do agregado natural, justificado pela natureza porosa de sua superfície.

Figura 5 – Agregados: (a) seixo e (b) concreto reciclado



Fonte: Autora (2024)

A água que foi utilizada para a realização da mistura e amassamento do

concreto permeável para a produção de placas foi proveniente da rede de abastecimento local da cidade de Belém, no bairro do Guamá.

3.3 MÉTODOS

3.3.1 Dosagem e produção dos concretos permeáveis

A metodologia de dosagem do concreto permeável foi baseada no trabalho de Castro et al. (2009), na qual se baseia em parâmetros físicos dos materiais como a massa específica e a massa unitária dos agregados, e índice de vazios do seixo rolado, a fim de determinar a proporção adequada dos materiais de construção utilizados na mistura de concreto permeável. Essa metodologia vem sendo utilizada em pesquisas na Universidade Federal do Pará, como a de Ribeiro e Silva (2018); Braga (2019) e Santos (2020), visando à produção de elementos de concreto permeável com alta permeabilidade. Para a produção do concreto permeável, foi utilizado o traço unitário de 1:4,47, em massa.

Os concretos foram produzidos com agregados presentes na faixa entre 2,38 mm – 4,76 mm e 4,76 mm – 9,5 mm. Nesta pesquisa não foram utilizados materiais finos na mistura para não diminuir a capacidade de permeabilidade das placas produzidas.

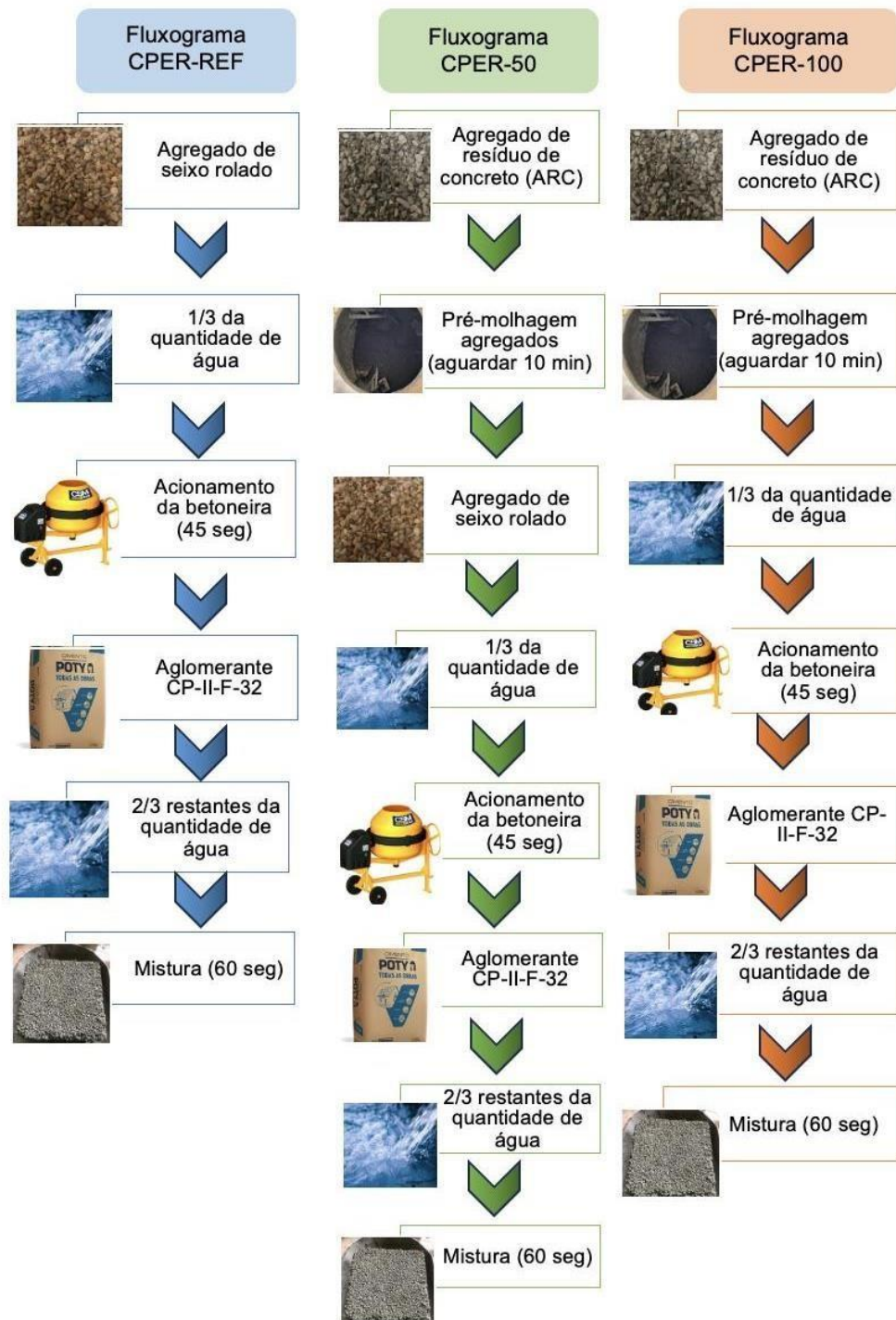
Encontra-se a tabela 4 o consumo de material de cada família de concreto permeável. A terminologia adotada baseia-se na quantidade de agregado reciclado, sendo “CPER-0” o traço de referência, “CPER-50” representando uma mistura com “50%” de agregado natural, e “CPER-100”, referente ao traço com 100% de agregado de concreto reciclado. Vale ressaltar que, no CPER-50, não foi utilizada a massa específica para o cálculo de compensação da quantidade de agregado natural e reciclado, onde a massa utilizada foi pesada considerando a massa total de agregados.

Tabela 4 - Consumo dos materiais em massa

Tipo de traço	Cimento (kg/m³)	Agregado natural (kg/m³)	Agregado Reciclado de Concreto (ARC) (kg/m³)	Água (kg/m³)
CPER-0	367	1640,5	-	135,8
CPER-50	445,5	995,7	995,7	164,8
CPER-100	524	-	2342,3	193,9

O processo de mistura de concreto foi realizado por meio de uma betoneira de eixo inclinado de 150 litros de capacidade, apresentando 40 rotações por minuto. A partir de testes prévios, atestou-se que a melhor ordem de mistura para a produção do concreto permeável seria como mostrada na figura 6.

Figura 6 - Ordem de mistura dos materiais



Fonte: Autora (2024)

Para cada combinação, apresenta-se uma ordem de mistura conforme mostra a figura 6. Nota-se que para as misturas com agregados reciclados, tomou-se o cuidado de previamente misturar em uma pasta de cimento, a fim de minimizar a quebra, conforme Santos (2020). Além disso, alguns autores como Para Kaplan *et al.* (2021) mostram que há uma rede de porosidade e microfissuras presentes na estrutura do agregado reciclado, que causam ocasionam um aumento no consumo de água, e, por isso, é importante que este passe por um processo de pré-molhagem para evitar a perda de água da mistura, que consiste em aspergir uma quantidade de água, e aguardar 10 minutos antes de misturar, conforme indica Bernardo (2019).

Após a mistura dos materiais, realizou-se uma análise visual no estado fresco deste material para avaliar a qualidade do concreto produzido, a partir da exsudação ou não da pasta que recobre os grãos de agregados graúdos. O segundo parâmetro avaliado foi o de coesão do concreto produzido, a partir do método proposto por Tennis *et al.* (2004), que determina a formação de uma esfera com a palma das mãos durante a moldagem do concreto permeável com o objetivo de avaliar, visualmente, se a relação água/cimento está adequada para a união dos grãos com o aglomerante hidráulico sem segregar, visando a eficácia na moldagem das placas.

Para a moldagem do concreto, utilizou-se um molde metálico quadrado de dimensões 40 cm x 40 cm x 10 cm. O processo de compactação após o despejo do concreto no molde, foi executado com um rolo metálico de 55 quilogramas que passará na superfície do material, aplicando energia em um movimento de vai-e-vem para adensar a placa de concreto permeável.

Devidamente adensadas, as placas de concreto permeável ficaram por 48 horas nos moldes metálicos – período recomendado para que não ocorra fragmentação das arestas e perda de material - e, após esse período, foram desmoldadas e inseridas em tanque com água (cura úmida) durante o período de 28 dias conforme determinado pela pesquisa. Vale ressaltar que os exemplares foram posicionados no tanque em suas menores seções transversais para evitar colmatação.

Ao retirar as placas do tanque, aferiu-se o cobrimento dos agregados pela pasta de cimento, a fim de verificar a ocorrência de efeito parede, condição na qual ocorre

uma barreira de pasta na superfície do material, na qual afeta a permeabilidade do sistema (Santos, 2020). Após a retirada das placas de dentro do tanque, as placas foram direcionadas para os ensaios normativos.

Referente ao parâmetros de dosagem, o mesmo objetiva avaliar o estado do concreto permeável produzido no estado fresco, através da análise da coesão e exsudação logo após a retirada do concreto da betoneira por meio de uma esfera de concreto permeável a partir do teste proposto por Tennis et al. (2004), e no estado endurecido onde, após a retirada das placas do tanque de cura, foi feita a avaliação da superfície do concreto para aferir se ocorreu efeito parede, efeito este que afeta as propriedades drenantes do material conforme mostra a figura 7:

Figura 7- Produção do concreto permeável



(a) Betoneira de 150 litros, (b) teste visual coesão de Tennis, (c) placas moldadas no molde metálico, (d) concreto permeável, (e) Tanque de cura. Fonte: Acervo da autora (2024)

3.3.2 Análise do efeito do agregado reciclado no comportamento físico-mecânico de concreto permeável

Para avaliar se o concreto permeável com agregado reciclado atende os parâmetros de desempenho mecânico estabelecidos pela NBR 16416 (ANBT, 2015) fora realizado o ensaio de resistência à tração na flexão e de compressão, conforme apresenta a figura 8.

No primeiro ensaio, utilizou-se 3 corpos de prova prismáticos de concreto (40 cm x 13 cm x 10 cm). Este ensaio conta com procedimentos normatizados de acordo com a NBR 12142 (ABNT, 2011). Os parâmetros normativos estipulam resistência mínima de 2 MPa de tração na flexão.

Para o ensaio de compressão, utilizou-se 3 corpos de prova prismáticos de concreto (20 cm x 13 cm x 10 cm), realizado através dos procedimentos normatizados de acordo com a NBR 9781 (ABNT, 2013). Os parâmetros normativos estipulam resistência mínima de 20 MPa. Estes valores de resistência são referentes aos pavimentos produzidos com concreto permeável e destinados ao tráfego leve de veículos, podendo ser aplicado, em áreas de passeio para pedestres como descrito na NBR 16416 (ANBT, 2015).

Figura 8 - Corpos-de-prova obtidos das placas de concreto



- a) Placa permeável, b) corpos-de-prova para ensaios, c) ensaio de compressão, d) ensaio de tração

Fonte: Acervo da autora (2024)

A porosidade total é um parâmetro relacionado ao volume total de poros presentes na amostra analisada. A totalidade dos poros leva em conta os poros fechados e os que estão conectados entre si ao longo do material. O parâmetro pode ser calculado por meio da Equação 3.3.3.2. (XU et al., 2018).

$$u_t = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_t}\right) \cdot 100 \quad (\text{Equação 3.3.3.2})$$

Onde:

- u_t = Porosidade total
- ρ_t = Densidade teórica (g/cm³)
- ρ_s = Densidade real do concreto (g/cm³).

A densidade teórica é estimada por meio da Equação 3.3.3.3. (ZHENG, 2004).

$$\rho_t = \frac{100 + P_c + 0,25P_c}{\frac{100}{\rho} + \frac{P_c}{\rho_c} + (0,25P_c \cdot 0,75)} \cdot \rho \quad (\text{Equação 3.3.3.3})$$

Onde:

- ρ_t = Densidade teórica (g/cm³)
- P_c = Razão cimento/agregado em massa,
- ρ_c = Massa específica do agregado (g/cm³)
- ρ_w = Massa específica da água (g/cm³)

O parâmetro da porosidade efetiva, diferentemente da porosidade total, leva em conta a quantidade de poros que estão conectados na estrutura e pode ser estimada pela Equação 3.4 (LEE e KIM, 2010).

$$u_e = \left(1 - \frac{m_1 - m_2}{u \cdot \rho_w}\right) \cdot 100 \quad (\text{Equação 3.3.3.4})$$

Onde:

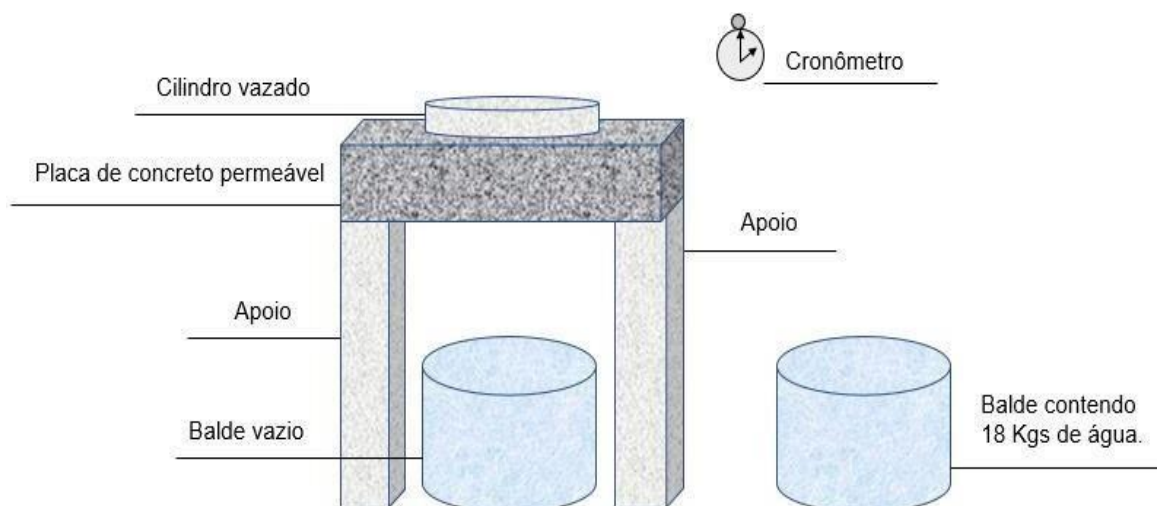
- u_e = Porosidade efetiva
- m_1 = Massa da amostra seca por 24 horas em estufa (g)
- m_2 = Massa da amostra saturada após submersão de 24 h em água (g)
- u = Volume da amostra em centímetro cúbico (cm³)
- ρ_w = Massa específica da água (g/cm³).

3.3.3 Análise do efeito do agregado reciclado no comportamento hídrico de concreto permeável

A caracterização hídrica é realizada pela NBR 16416 (ABNT, 2015), onde o coeficiente de permeabilidade é calculado como parâmetro da capacidade de infiltração de fluidos, como a água, no interior da estrutura granular do concreto permeável e deve ser estimado para comparação com o valor mínimo presente na norma vigente de 10^{-3} metros por segundo (ANBT, 2015).

O ensaio de permeabilidade conta com os seguintes equipamentos para sua realização: cilindro de PVC com 300 milímetros de diâmetro, massa de calafetar para fixação do cilindro sobre o elemento de concreto, balde para despejar a água, cronômetro para aferir o tempo de infiltração do líquido e baldes vazios para recolher a água lançada sobre a amostra de concreto.

Figura 9– Esquema de caracterização hídrica



Fonte: Santos, 2020.

A placa de concreto permeável deve ser colocada sobre duas estruturas suficientemente resistentes para apoiá-la. Assim, o sistema montado permite a captação da água que irá atravessar o concreto drenante. Abaixo do material é colocado um balde vazio que irá acumular a água passante para ser descartada, posteriormente. Serão feitas 5 repetições. A seguir é mostrado como será

determinado o coeficiente de permeabilidade do material, a partir dos dados obtidos por meio da Equação 3.3.3.1.

$$k = \frac{C \cdot m}{d^2 \cdot t} = \text{coeficiente de permeabilidade} \quad (\text{Equação 3.3.3.1})$$

Onde:

- k = Coeficiente de Permeabilidade (mm/H)
- C = Fator de Correção de Unidade do Sistema S.I. = 4583666000
- m = Massa de água (Kg)
- d = Diâmetro interno do cilindro (mm)
- t = Tempo de infiltração (s)

Considera-se como satisfatório, segundo as prescrições normativas, um valor de coeficiente de permeabilidade superior a 10^{-3} m/s. Outro ponto importante para análise é a macro porosidade, medindo a quantidade de vazios pelos quais a água se infiltra por meio dos ensaios de porosidade total e efetiva nos prismas de 20 cm x 10 cm x 10 cm extraídos das placas.

4 **APRESENTAÇÃO DE DISCUSSÃO E RESULTADOS**

4.1 **EFEITO DO TIPO DE AGREGADO NA ANÁLISE VISUAL DO CPER**

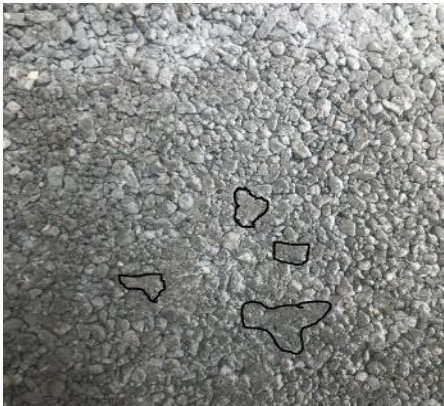
A tabela 5 apresenta os resultados da análise visual do concreto permeável no estado fresco e endurecido. As placas não sofreram exsudação e apresentaram coesão suficiente entre os grãos de seixo, exceto o CPER-100 que apresentou baixa coesão, observado na figura 10, o que afetou um pouco a trabalhabilidade do concreto. No estado endurecido, o cobrimento foi satisfatório, uma vez que as placas sem agregado reciclado e com 50% de RCC não apresentaram efeito parede.

Na figura 10, apresenta-se a imagem da placa CPER-100, em que se nota alguns pontos de efeito parede. Para evitar o este fenômeno efeito é necessário o monitoramento durante a concretagem, com intuito de identificar qualquer irregularidade na distribuição dos materiais, e na compactação adequada durante a concretagem para garantir uma distribuição uniforme dos materiais, a fim de evitar a concentração de pasta em pontos da amostra, visto que esse efeito pode impactar na permeabilidade do sistema. Porém, nesta pesquisa percebe-se que os pontos visíveis não afetaram de forma drástica nos parâmetros hídricos.

Tabela 05 - Avaliação do concreto permeável

Traço	Estado Fresco		Estado Endurecido	
	Coesão	Exsudação	Efeito Parede	Cobrimento dos Grãos
CPER-0	Sim	Não	Não	Satisfatório
CPER-50	Sim	Não	Não	Satisfatório
CPER-100	Não	Não	Sim	Satisfatório

Figura 10 - Análise visual de efeito parede no CPER-100

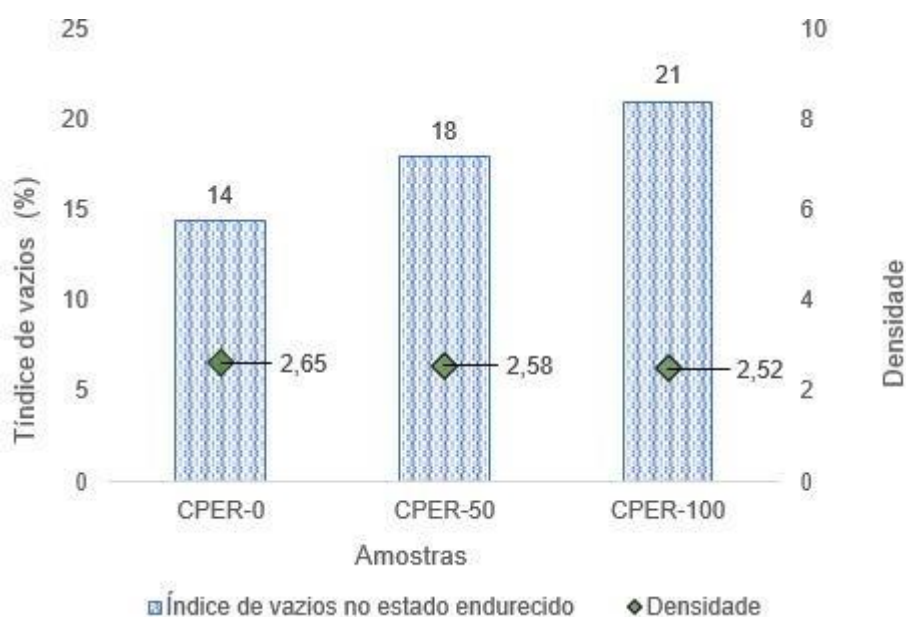


Fonte: Autora (2024)

4.2 EFEITO DO TIPO DE AGREGADO NOS PARÂMETROS FÍSICOS DO CPER

Na figura 11, é possível observar o valor da densidade e de índice de vazios de concretos permeável no estado endurecido, em cada tipo de traço. É notável que quanto maior o teor de agregado reciclado, maior o índice de vazios e menor a densidade da peça. Uma das explicações é devido a massa específica do agregado reciclado ser inferior ao do natural, o que justifica o comportamento inverso entre índice de vazios e densidade.

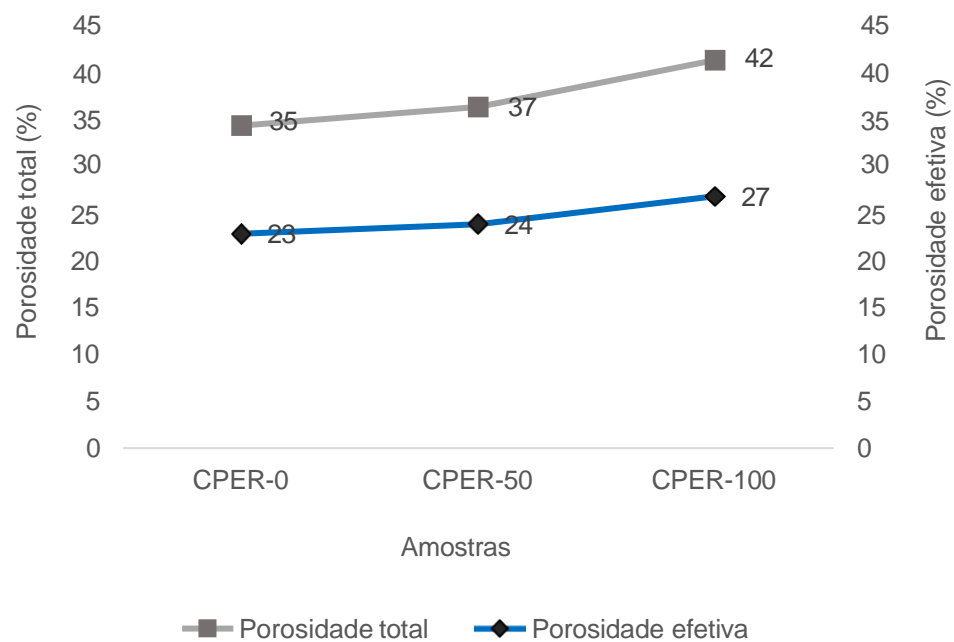
Figura 11 - Densidade e índice de vazios no estado endurecido



Pelos resultados do índice de vazios é possível inferir a porosidade total do material, conforme Xiao *et al* (2023) e Candian Filho *et al* (2022), que neste caso é maior para as misturas com RCC. Atribui-se este comportamento a perda rápida das consistências das misturas com agregados reciclados, o que dificulta o processo de moldagem. O formato do material também é um parâmetro que influencia nos resultados, pois um material de forma angular e textura áspera, tende a reduzir a fluidez e afetar moldagem e adensamento das placas. Essas características colaboram na introdução de mais ar na mistura, influenciando na porosidade e redução da densidade no estado endurecido, conforme citado por Strieder (2020).

Para que o concreto permeável possua boa capacidade de infiltração, é necessário que o material apresente um elevado volume de vazios conectados na estrutura. Os parâmetros que podem ser inferidos pela análise de dados de porosidade efetiva e total estão na figura 12, e nota-se que os dados encontrados para porosidade efetiva estão dentro do intervalo de porosidade ótima de 15% a 35% de poros conectados (Kia, Wong e Cheeseman, 2017; Ahmet e İsmail, 2021).

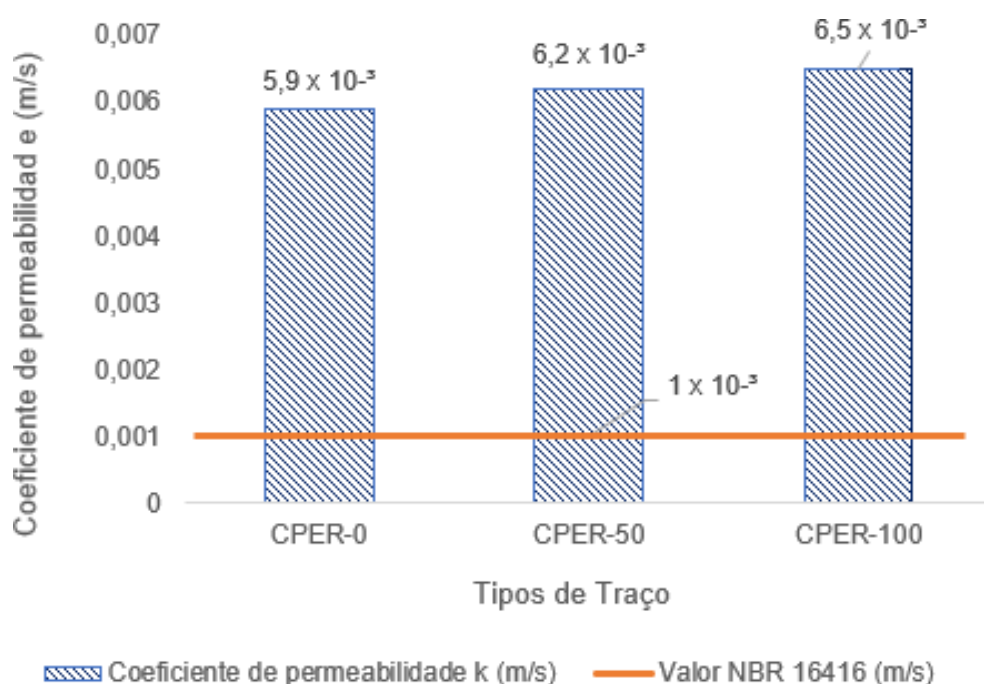
Figura 12 - Porosidade total e efetiva



4.3 EFEITO DO TIPO DE AGREGADO NA DRENAGEM DOS CPER

Os resultados indicaram que as propriedades hidráulicas do material atendem aos valores normativos para pavimentos drenantes. Os concretos produzidos apresentaram valores de coeficiente de permeabilidade superiores ao valor mínimo de $k = 1 \times 10^{-3}$ m/s (figura 13) recomendado em norma ABNT 16416: 2015, e de $k = 1,4 \times 10^{-3}$ a $12,2 \times 10^{-3}$ m/s considerando a norma da ACI 5225-10

Figura 13 - Caracterização hídrica.



As placas apresentaram boas capacidades permeáveis, onde essa propriedade pode ser aproveitada como uma solução apropriada para os problemas de drenagem no contexto urbano apresentados por Santos (2020). A água infiltrou sem dificuldade da superfície para o interior da placa, atravessando internamente pelos vazios do esqueleto granular. Esses valores estão dentro dos intervalos encontrados por alguns autores como El-Hassan *et al.* (2019) na faixa de 1,95 a 21,14 mm/s e Strieder (2021) 5,61 e 27,09 mm/s. Apesar dos valores da pesquisa não terem sido superiores a 10 mm/s em comparação com as referências citadas, eles atingiram o objetivo da propriedade hidráulica.

Na figura 14 e 15 é apresentada a correlação proposta entre a porosidade total e o coeficiente de permeabilidade e a correlação entre a porosidade efetiva e o coeficiente de permeabilidade dos devidos traços dos concretos permeáveis produzidos. Os valores são próximos, mas é possível notar um pequeno aumento no coeficiente de permeabilidade conforme aumenta o teor de substituição e, consequentemente sua porosidade.

Figura 14 – Correlação porosidade total e coeficiente de permeabilidade

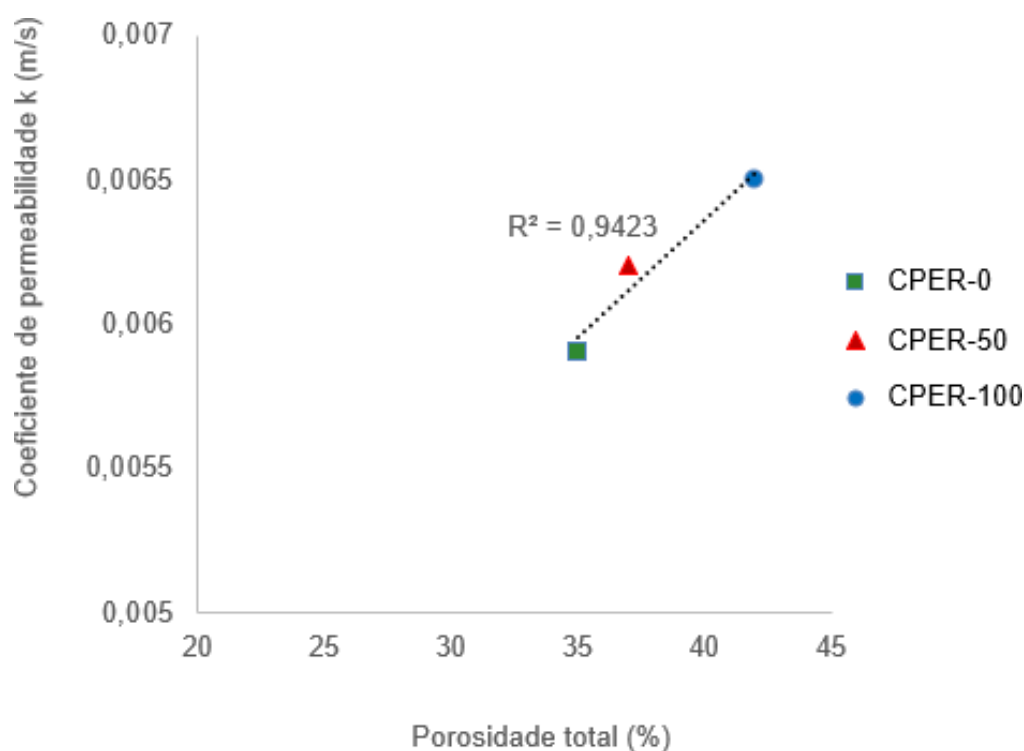
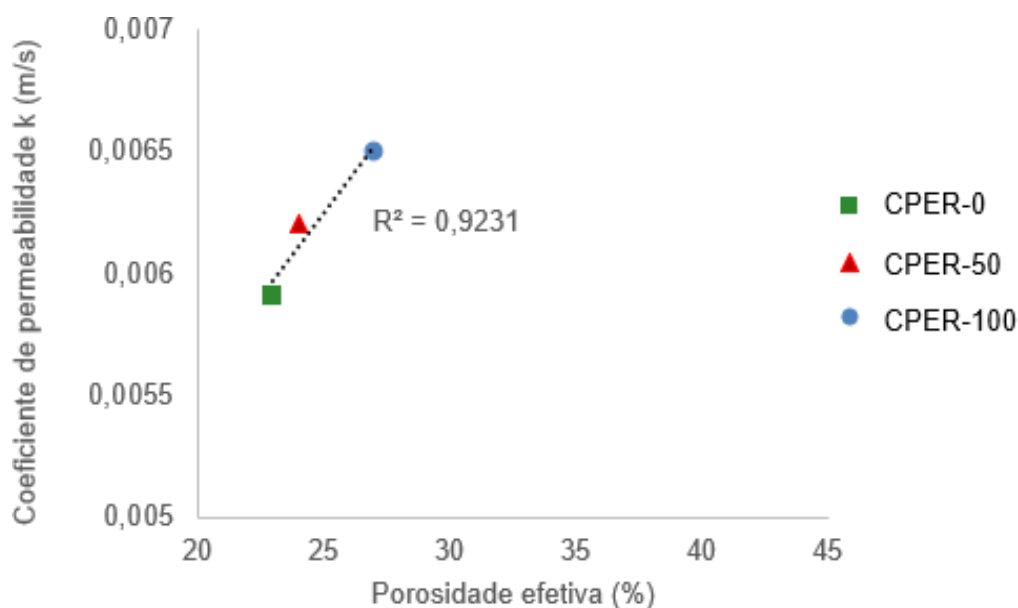


Figura 15 – Correlação porosidade efetiva e coeficiente de permeabilidade



Segundo algumas pesquisas, a correlação de porosidade e permeabilidade, considerando maiores intervalos e grande volume de dados, possui tendência exponencial (Martin *et al*, 2014), porém quando se consideram intervalos menores e poucos dados, como é o caso da presente pesquisa, possui uma tendência linear (Gaedicke, 2014; Neptune, 2010). Assim, foi proposta uma correlação linear considerando porosidade total de 35%-42% e um intervalo de permeabilidade de 5,9-6,5 mm/s, e o coeficiente de determinação obtido (R^2) foi de 0,94 demonstrando uma forte ligação entre porosidade total e permeabilidade. A correlação linear entre porosidade efetiva de 23%-27% com a permeabilidade também demonstrou intensa ligação com coeficiente R^2 obtido de 0,92.

4.4 ANÁLISE DO TIPO DE AGREGADO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CPER

A figura 16 e 17 apresentam respectivamente os resultados de resistência a compressão uniaxial e tração na flexão dos corpos-de-prova com diferentes teores de substituição do agregado natural pelo reciclado, após 28 dias de cura.

Figura 16 - Valores médios de resistência a compressão simples

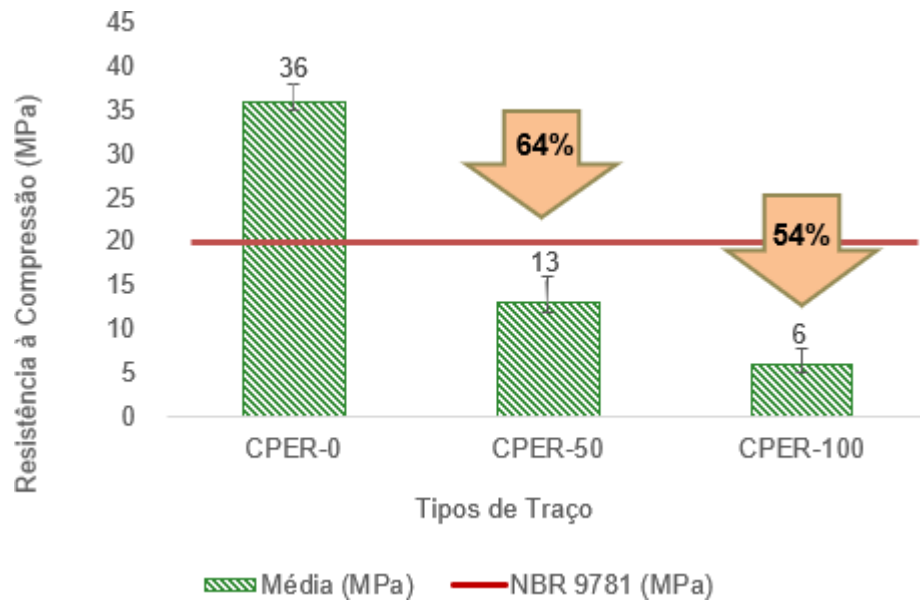
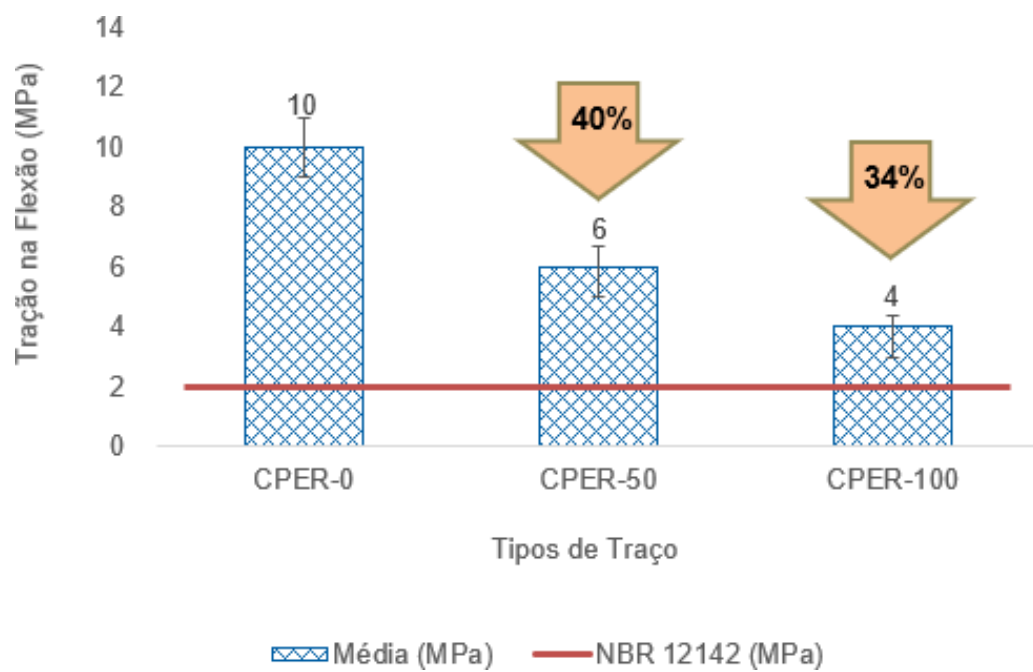


Figura 17 - Valores médios de tração na flexão



É notável que conforme a porcentagem de agregado reciclado aumenta na composição dos concretos, a resistência a compressão diminui. Os valores de resistência obtidos ficaram 6 MPa para CPER-100 e 13 MPa para CPER-50, sendo que o traço de referência atingiu a média de 36 MPa. Apesar de somente o concreto de referência ter atingido a NBR 9781, todas as amostras atingiram a permeabilidade e a tração na flexão. Houve redução de 64% na resistência do concreto de referência para as placas com 50% de ARC, e de 54% de resistência das placas com 50% de ARC para as placas com 100% de ARC. Os valores do CPER-50 estão muito aproximados das literaturas como Güneyisi *et al.* (2014) que encontraram resistência à compressão simples aos 28 dias de 13,5 a 20 MPa e Zaetang *et al.* (2016) entre 13 à 17 MPa, e o CPER-0 do trabalho de Strieder (2021), que obteve compressão de 9 MPa no traço com 100% de agregado reciclado com amostras de piso *in loco*.

Apesar de ter sido utilizado na composição do CPER duas granulometrias (#2,38mm e #4,76mm) que estabelecem um arranjo granulométrico que melhora os pontos de contato entre as partículas, o que facilita a distribuição de esforços melhorando a resistência, ainda assim não foi o suficiente. A alta redução da resistência pode ser explicada pelo fato de que os agregados reciclados podem conter impurezas ou revestimentos que prejudicam a aderência com a matriz de cimento, resultando em um concreto de baixa resistência (Lemanska, 2019), pois há duas zonas de transição entre o agregado reciclado e a matriz de concreto: a primeira é entre o agregado e a pasta de cimento antiga e a segunda é entre o agregado reciclado e a pasta de cimento nova (Oliveira, 2023).

Além disso, os resultados da literatura foram obtidos com agregados (ARC) provindos de concretos produzidos com agregado brita, que naturalmente é mais resistente que o seixo, devido sua forma e textura mais rugosa em comparação ao seixo de textura mais lisa e forma mais arredondada (Oliveira *et al.*, 2018). Dessa forma, a composição do ARC desta pesquisa possui menos resistência comparado as literaturas já citadas, sendo assim plausível os resultados do CPER-100 apresentar uma resistência abaixo das referências, porém aproximadas.

É importante mencionar que, embora o uso de agregado reciclado tenha diminuído consideravelmente a resistência à compressão do concreto permeável, os

resultados alcançados do CPER-50 ainda atendem às faixas típicas propostas pelo ASTM C39. Vale ressaltar que a NBR 16416 (ABNT, 2015) referencia as normas que contém os métodos para a determinação das propriedades mecânicas de concreto convencional. Diante disso Zhong et al. (2018) afirmam que os métodos de teste padronizados para concreto convencional podem não ser aplicáveis ao concreto permeável devido à sua estrutura porosa. Deste modo, a ausência de métodos de ensaio padronizados desenvolvidos para esse tipo de material, dificulta as comparações entre diferentes pesquisas.

No caso da resistência flexo-tração os valores obtidos ficaram entre 4,45 MPa e 10,15 MPa, cumprindo com a resistência mínima estabelecida pela norma brasileira NBR 16416/2015 de >2 MPa.

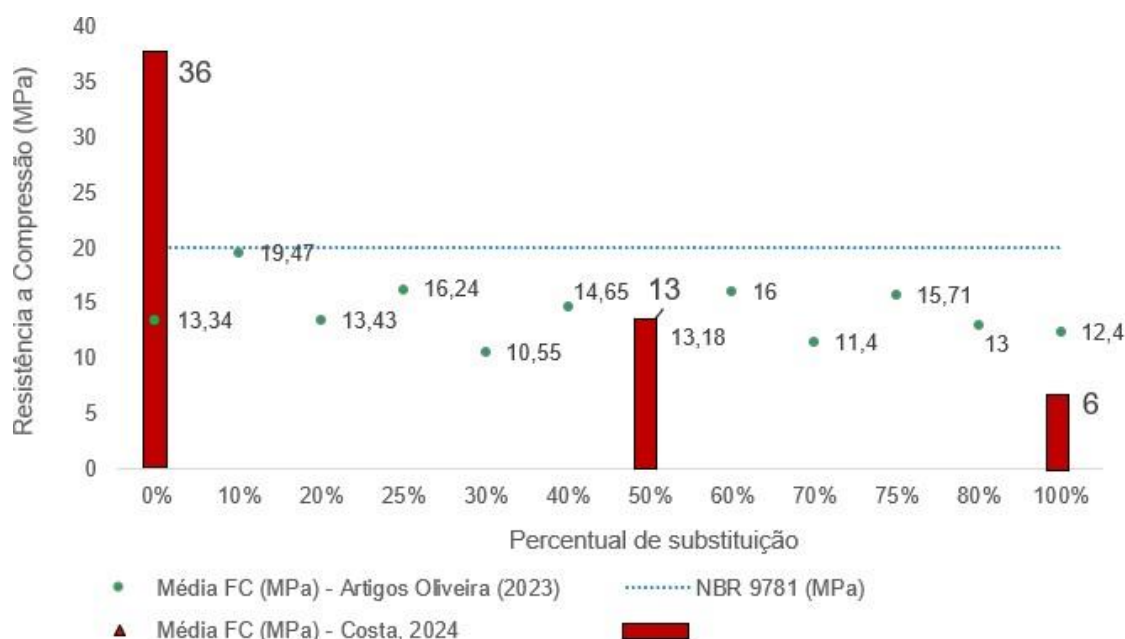
Os resultados mecânicos obtidos também estão em consonância com os resultados de densidade no estado endurecido e de porosidade, visto que as amostras com maior quantidade de agregado reciclado criaram mais vazios e reduziram a densidade, aumentando assim sua permeabilidade, porém diminuindo a resistência a compressão e tração na flexão.

4.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS EM UM CENÁRIO GERAL DE TRABALHOS COM CONCRETO PERMEÁVEL

O trabalho de Oliveira (2023) contribui com o conhecimento acerca da utilização de agregados reciclados na produção de concreto permeável, por meio da seleção de artigos nas bases de dados dos últimos 15 anos, com o objetivo de avaliar as propriedades do concreto com materiais recicláveis de diferentes tipos, tamanhos e teores, utilizando a Revisão Sistemática de Literatura (RSL) como metodologia.

A figura 18 apresenta os resultados mecânicos dessa pesquisa em comparação com os artigos coletados e analisados por Oliveira (2023), focando no teor de substituição do agregado natural pelo reciclado, porém considerando que existe uma grande variabilidade na composição do tipo de agregado reciclado (concreto estrutural, misto, natural, bloco de cerâmica vermelha, bloco de concreto, pavimento asfáltico, pavimento de concreto e vidro) e na granulometria com 80% dos trabalhos com agregado graúdo variando de 4,76 mm a 25,4 mm e 20% com composição mista (agregados graúdos e miúdos).

Figura 18 – Gráfico comparativo de resistência a compressão



Os resultados dos artigos da pesquisa de Oliveira (2023) variam de 10,55 MPa a 19,47 MPa. O CPER-100 desta pesquisa ficou abaixo dos resultados gerais esperados e o CPER-0 (de referência) ficou bem acima das médias apresentadas, sendo o CPER-50 o que apresentou o valor mais preciso em comparação com o arsenal de artigos que trabalharam com 50% de substituição. Vale ressaltar que a composição do agregado reciclado desta pesquisa, em sua grande maioria, possui seixo, material não contido nos 53 artigos citados no trabalho de Oliveira, e pouco explorado em demais artigos, ressaltando a relevância dos dados desta pesquisa para preenchimento de lacuna de conhecimento nessa área.

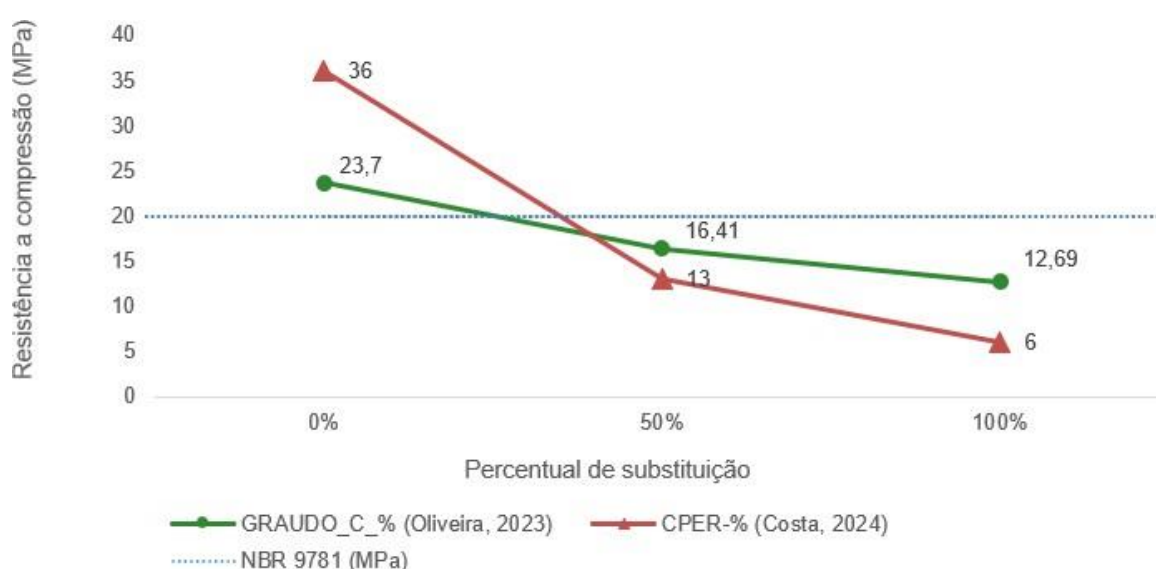
Dos artigos explorados fez-se também uma análise estatística com base nas combinações encontradas na literatura de “tipo de material, tamanho e porcentagem”, e as combinações mais aproximadas para efeito de relação foram os denominados “GRAUDO_C_%” que significam:

- *GRAUDO* é a composição de agregado variando de 4,76mm a 25,4mm;
- *C* é agregado reciclado provindo de concreto estrutural;

- % são as substituições que variam de 0% a 100%, mas foram escolhidas as substituições de 0%, 50% e 100%, mesmas porcentagens utilizadas na presente pesquisa.

A figura 19 apresenta o comparativo das resistências obtidas das médias das combinações GRAUDO_C_0%, GRAUDO_C_50% e GRAUDO_C_100% com os resultados obtidos do CPER-0, CPER-50 e CPER-100.

Figura 19 – Resistências a compressão de “CPER-%” versus “GRAUDO_C_%”



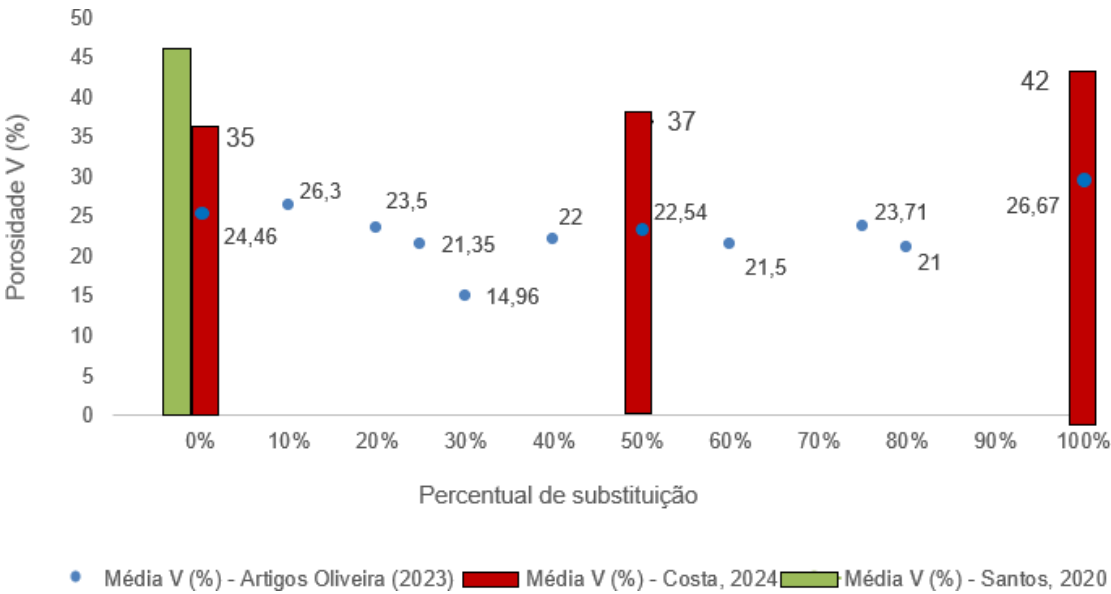
O GRAUDO_C_100 possui maior resistência que o CPER-100, enquanto ambas as amostras com 50% (GRAUDO_C_50 e CPER-50) possuem valores aproximados entre si, onde este está abaixo daquele, corroborando as discussões realizadas que os valores estão próximos, porém sempre abaixo dos artigos de referência.

Ambas as amostras de referência (GRAUDO_C_0% e CPER-0) apresentaram alta resistência e atenderam a NBR 9781:2013. Apesar da brita ser naturalmente mais forte que o seixo e grande parte dos trabalhos citados foram produzidos com a brita, a provável explicação para a resistência do CPER-0 ser maior pode estar atrelada ao método de dosagem de Castro (2009) que se mostrou eficaz e vem sendo utilizado em vários trabalhos na UFPA desde 2017, metodologia essa que se baseia em parâmetros físicos, como o índice de vazios, para determinar a proporção adequada dos materiais na mistura do concreto permeável, utilizando uma

composição granulométrica otimizada de duas faixas compreendidas entre 9,5 mm - 4,75 mm e 4,75 mm - 2,36 mm,resultando em uma melhor compactidade, garantindo boa permeabilidade e resistência.

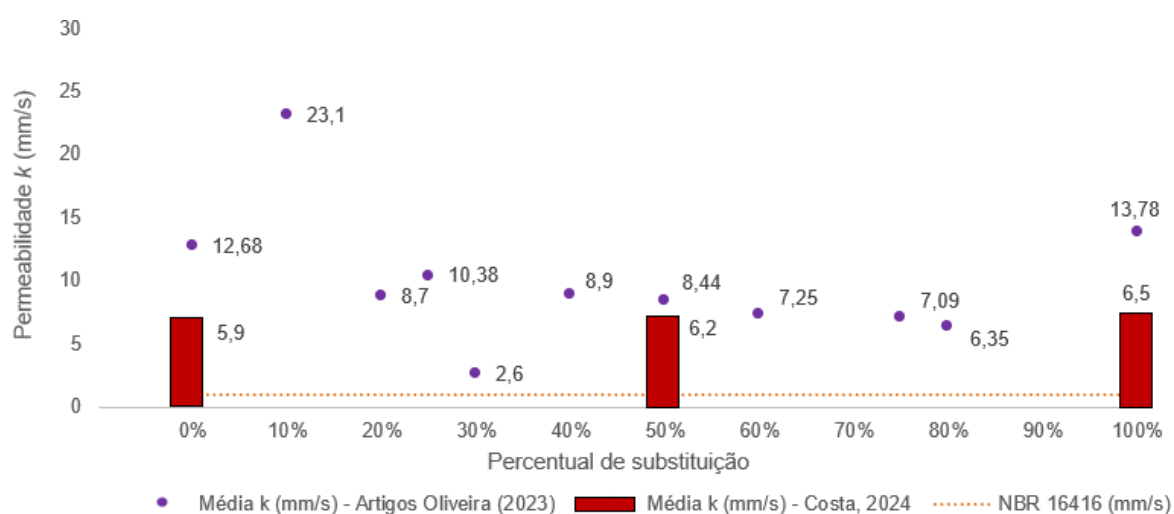
A figura 20 mostra os resultados de porosidade total dessa pesquisa em comparação com porosidade dos artigos coletados e analisados por Oliveira (2023). As porcentagens obtidas de porosidade total estão superiores aos da literatura, porém similares aos resultados de Santos (2020) com 45,36% de porosidade, que produziu concretos permeáveis com seixo em sua composição, com materiais mais semelhantes a este estudo. Todos os trabalhos apresentaram uma porcentagem adequada da porosidade para funcionamento otimizado do concreto permeável.

Figura 20 – Comparativo de porosidade Costa (2024) versus Oliveira (2020)



Já a figura 21 apresenta o comparativo de permeabilidade, com resultados próximos dos intervalos obtido dos artigos de Oliveira (2020) e, apesar de estarem um pouco abaixo do grupo de artigos, atingem os parâmetros hidráulicos, com valores acima da NBR 16416.

Figura 21 – Comparativo de permeabilidade Costa (2024) versus Oliveira (2020)



5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados, concluiu-se que os concretos permeáveis com agregado reciclado na sua composição atenderam em todos os níveis de substituição os requisitos da NBR 16416 (ABNT 2015), com permeabilidade satisfatória com valores superior a 1 mm/s, e na tração na flexão acima de 2 MPa.

Houve impacto positivo na drenagem dos concretos permeáveis, com propriedades hidráulicas que atenderam aos valores normativos para pavimentos drenantes. Os coeficientes de permeabilidade foram superiores aos valores mínimos recomendados pelas normas, indicando boas capacidades permeáveis e sendo uma solução adequada para problemas de drenagem urbana. A água infiltrou facilmente pelas placas, atravessando os vazios do esqueleto granular, com correlações entre porosidade e permeabilidade destacando a importância desses parâmetros na capacidade de drenagem. Essas informações são fundamentais para o desenvolvimento de soluções eficazes de drenagem urbana com concreto permeável.

Na análise visual, o tipo de agregado utilizado teve impacto no concreto permeável com 100% de substituição, apresentando baixa coesão e pontos de efeito parede. Apesar disso, os parâmetros hídricos não foram afetados. Medidas preventivas durante a concretagem são essenciais para garantir a distribuição homogênea dos materiais e a permeabilidade do sistema.

Referente aos parâmetros físicos, o aumento do teor de resíduo resultou em menor densidade devido à massa específica inferior do agregado reciclado. Isso gerou uma relação inversa entre o índice de vazios e a densidade do concreto. A porosidade total foi maior nas misturas com agregado reciclado, devido à perda rápida de consistência e às características do material que afetaram a fluidez e adensamento, introduzindo mais ar na mistura.

Para a capacidade de infiltração adequada, o concreto permeável deve apresentar um elevado volume de vazios conectados. Os dados de porosidade efetiva encontrados estão dentro do intervalo ideal, ressaltando a importância de considerar o tipo de agregado e seus efeitos nos parâmetros físicos do material para garantir o desempenho adequado do concreto permeável.

No ensaio de compressão somente o concreto permeável de referência atingiu a NBR 9781 (acima de 20 MPa). Apesar dos concretos com 50% e 100% de substituição não atingirem a norma, estão em consonância com demais literaturas onde as amostras com essas porcentagens também não atingiram a NBR 9781, o que demonstra que, para atingir este objetivo e tentar manter uma substituição de 100% de agregado reciclado provindo de concreto com seixo, são necessários estudos mais aprofundados como análise de MEV para melhor entendimento da zona de transição e da presença de microfissuras e poros causados pela trituração do resíduo durante a produção do agregado, e a incorporação de outros materiais, como por exemplo aditivos, com quantidade ótima para equilíbrio entre resistência mínima e garantia de permeabilidade.

Após as análises realizadas, foi confirmada a viabilidade do uso de agregado reciclado na fabricação do Concreto Permeável, representando uma solução eficaz para combater o descarte irregular de resíduos e a escassez de agregados naturais. Além disso, o CPER produzido com agregado reciclado é reconhecido como uma alternativa econômica e ambientalmente sustentável para promover o desenvolvimento verde e sustentável da sociedade. Nesse sentido, espera-se que os resultados desta pesquisa sejam considerados por futuros pesquisadores e contribuam para ampliar o conhecimento sobre o CPER fabricado com resíduos da construção civil.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Existe ainda um campo vasto de exploração do tema de concreto permeável produzido com agregado reciclado provindo de concretos produzidos com seixo. É possível realizar mais traços com substituições de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% e 100% a fim de avaliar o potencial dessas substituições.
- Nesta pesquisa, através do método de Castro (2009) utilizado para calcular o consumo de cimento, o traço do CPER-100 obteve consumo de cimento alto, acima dos resultados da literatura. Considerar a utilização de materiais cimentícios alternativos, como escória de alto forno para reduzir esse consumo de cimento, seria uma opção viável.
- Estudo de custo sobre economia no uso de materiais recicláveis no lugar de agregados naturais.

6 REFERÊNCIAS

ABNT NBR 12142:2010 – Concreto - Determinação da resistência a tração na flexão. Rio de Janeiro, 2010.

ABNT NBR 9781:2013 - Peças de concreto para pavimentação: especificação e métodos de ensaio, 2013.

ABNT NBR 16416: Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro, 2015.

Abrão, Pedro Cesar Rodrigues Alves. O uso de pozolanas como materiais cimentícios suplementares: disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais. Dissertação de mestrado, USP, São Paulo, 2018.

Ahmet Akkaya, İsmail Hakkı Çağatay. Investigation of the density, porosity, and permeability properties of pervious concrete with different methods. Construction and Building Materials. Volume 294, 2 August 2021, 123539

Amaral, Marcella; Macioski, Gustavo; Medeiros, Marcelo Henrique Farias de. Atividade pozolânica da sílica ativa: análise em pastas cimentícias com diferentes teores de substituição. Matéria, 2021, Vol.26 (3)

Andrade, D. da S., Silva, A. C. da S., & Bárbara, L. de S. S. (2019). Concreto permeável com adições minerais altamente reativas / Permeable concrete with high reactive mineral additions. Brazilian Journal of Animal and Environmental Research, 2(5), 1549–1568.

American Concrete Institute (ACI). Pervious Concrete. 2006. ACI-522R-06. Report On Pervious Concretes. Michigan.

ACI Committee 318. (2019). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-19) and commentary. American Concrete Institute.

American Concrete Institute (ACI). Pervious Concrete. 2010. ACI 522R-10. -Report On Pervious Concretes. Michigan.

ANGELIN, A. F.; LINTZ, R. C. CECCHÉ; BARBOSA, L. A. G. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete modified with lightweight and recycled aggregates. Revista IBRACON de estruturas e materiais, 2018, Vol.11 (1), p.76-94

ASTM C1701 - Standard Test Method for Infiltration Rate of in Place Pervious Concrete, 2020.

ASTM C1609/C1609M-18 - Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading) (2019).

ASTM C39 – Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens e a ACI 318 – Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, (2021).

BATEZINI, R. Pesquisas tem destacado a capacidade do concreto permeável de filtrar e reter partículas poluentes, melhorar a qualidade da água e ajudar na recarga de aquíferos subterrâneos. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo (SP), 2019.

BENACHIO, Gabriel Luiz Fritz; FREITAS, Maria Do Carmo Duarte; TAVARES, Sérgio Fernandes. Circular Economy in Construction Industry: A systematic literature review. Journal of Cleaner Production. Volume 260, 1 July 2020, 121046

Bigotto, Sherington Augusto Milani. Estudo de traços de concreto permeável com adição de areia e sílica. Dissertação de Mestrado, UNESP, Ilha Solteira (SP), 2021.

BRAGA, N. T. S. Concretos permeáveis na Amazônia: Desafios e potencialidades regionais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, 2019.

Busch, Pablo; Kendall, Alissa; Murphy, Colin W.; Miller, Sabbie A. Literature review on policies to mitigate GHG emissions for cement and concrete. Resources, conservation and recycling, 2022, Vol.182, p.106278

BUTTLER, A.M. Concrete with recycled concrete coarse aggregates Influence of age recycling in the properties of recycled aggregates and concretes. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003, 199p.

Candian Filho, E. L., Ferreira, G. C. dos S., Nogarotto, D. C., & Pozza, S. A. (2022). Pervious concrete with waste foundry sand: mechanical and hydraulic properties. *Matéria* (Rio De Janeiro), 27(1), e13154. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620220001.1354>

CASTRO, J.; SOLMINIHAC, H.; VIDELA, C.; FERNANDEZ, B. Estudio de dosificaciones en laboratorio para pavimentos porosos de hormigón. *Revista Ingeniería de Construcción* Vol. 24 N°3, 2009

Chandrappa, A.K. and K. P. Biligiri. 2016. "Influence of Mix Parameters on Pore Properties and Modulus of Pervious Concrete: An Application of Ultrasonic Pulse Velocity." *Materials and Structures* 49(12):5255–1.

Coelho, Matheus Wilson Fonseca; Rocha, Camila Aparecida Abelha. Influência do tamanho do agregado na permeabilidade e na resistência do concreto permeável. ANAIS DO 61º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO - CBC2019 –61CBC 2019

Correa, Priscila Marques. Concreto ambientalmente mais sustentável com inclusão de cinza de casca de arroz sem controle de queima e polipropileno pós-consumo. UFRGS. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. 2020.

Cominato, Vinícius; Benavente Canteras, Felipe; Andréia Gachet, Luísa; Cristina Cecche Lintz, Rosa. The effect of granulometry of natural and recycled coarse aggregate on permeable concrete properties. Elsevier ScienceDirect Journals Materials today: proceedings, 2022, Vol.65, p.1711-1718

CORDEIRO, Juliana Chaves; FREITAS, Denny Martins; CORDEIRO, Luciana de Nazaré Pinheiro; SILVA, Arthur Aviz Palma. Avaliação dos processos de mistura de concretos permeáveis com seixo. Research, Society and Development, v. 10, n. 4, e31110414205, 2021.

Ćosić, K., L. Korat, V. Ducman, and I. Netinger. 2015. "Influence of Aggregate Type and Size on Properties of Pervious Concrete." Construction and Building Materials 78:69–6.

Dai, Shengnan ; Wu, Xianghao ; Zhou, Haoran ; Li, Wei ; Jiang, Xingquan ; Liang, Bingham. Experimental Study on Mechanical Properties of Permeable Concrete. Earth and environmental science, 2019, Vol.233 (3), p.32037

E. F. FELIX; E. POSSAN. Balanç das emissões e da captura de CO2 em estruturas de concreto: simulação em função do consumo e tipo de cimento. Rev. IBRACON Estrut. Mater. 11 (01). 2018

EUROPEAN COMMISSION. *Closing the loop* - an EU action plan for the Circular Economy. 2015. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52015DC0614>.

FARIAS, Evilane Cassia de. Avaliação da durabilidade frente ao ataque de CO2 e Cl- em concretos autotensáveis com elevadores teores de resíduo da biomassa da cana-de-açúcar e metacaulim. 2019. 172f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

FERREIRA, A. N. A emissã de CO₂ e o gasto energético na manutenção de rodovias: um estudo na BR 262. Pós-Graduação em Recursos Naturais da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Mato Grosso do Sul, 2018

FINI, Alessio ; Frangi, Piero ; Comin, Sebastien ; Vigevani, Irene ; Rettori, Andrea Alberto ; Brunetti, Cecilia ; Moura, Bábara Baesso ; Ferrini, Francesco. Effects of pavements on established urban trees: Growth, physiology, ecosystem services and disservices. *Landscape and urban planning*, 2022, Vol.226, p.104501

Gaedicke, C., Marines, A., Miankodila, F. A method for comparing cores and cast cylinders in virgin and recycled aggregate pervious concrete, *Constr. Build. Mater.* 52 (2014) 494–503.

GÜNEYISI, E.; GESOĞLU, M.; KAREEM, Q.; İPEK, S. Effect of different substitution of natural aggregate by recycled aggregate on performance characteristics of pervious concrete. *Materials and Structures*, v. 49, 2014.

HAGER, Izabela; Tracz, Tomasz; Choińska, Marta; Mró, Katarzyna. Effect of Cement Type on the Mechanical Behavior and Permeability of Concrete Subjected to High Temperatures. *Materials*, 2019, Vol.12 (18), p.3021

HASHIM, Tameem Mohammed; Al-Mulali, Mohammed Zuhear; Al-Khafaji, Fatimah Fahem; Alwash, Ali Abdul Ameer ; Ali, Yasar Ameer. An experimental comparison between different types of surface patterns of permeable interlocking concrete pavement for roadway subsurface drainage. *Construction Materials*, 2022, Vol.17, p.e01227

HU, Maochuan ; Zhang, Xingqi ; Siu, Yim ; Li, Yu ; Tanaka, Kenji ; Yang, Hong; Xu, Youpeng. Flood Mitigation by Permeable Pavements in Chinese Sponge City Construction. *Journals Water (Basel)*, 2018, Vol.10 (2), p.172

Xiao Jianzhuang, Zhenyuan Lv, Zhenhua Duan, Chuanzeng Zhang. Pore structure characteristics, modulation and its effect on concrete properties: A review. Construction and Building Materials. Volume 397, 15 September 2023, 132430

JUNIOR, Adilson Campos de Paula. Estudo do potencial de aplicação de resíduo de concreto em substituição ao agregado graúdo para concretos permeáveis. Dissertação – UFJF, Juiz de Fora, 2019.

KIA, Alalea; WONG, Hong S.; CHEESEMAN, Christopher R. Clogging in permeable concrete: A review. Journal of Environmental Management, Volume 193, 15 May 2017, Pages 221-233

LAMB, G.S. Desenvolvimento e análise de desempenho dos elementos de drenagem fabricados em concreto permeável. Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2014

LEMANSKA, Justyna Jaskowska. Impurities of recycled concrete aggregate -types, origin and influence on the concrete strength parameters. IOP conference series. Materials Science and Engineering, 2019, Vol.603 (4), p.42056

LEI, Bin; Li, Wengui; Luo, Zhiyu ; Tam, Vivian W. Y. ; Dong, Wenkui ; Wang, Kejin. Performance Enhancement of Permeable Asphalt Mixtures with Recycled Aggregate for Concrete Pavement Application. Frontiers in Materials, Sec. Structural Materials, Volume 7 - 2020.

LEI, Bin; Xiong, Qianghui; Tang, Zhuo; Yao, Zhimin; Jiang, Jianguo. Effect of Recycled Aggregate Modification on the Properties of Permeable Asphalt Concrete. Sustainability 2022, 14(17), 10495 Cominato et al (2022), Wu et al, 2022).

LI, Jiusu ; Zhang, Yi ; Liu, Guanlan ; Peng, Xinghai. Preparation and performance evaluation of an innovative pervious concrete pavement. Construction & building materials, 2017, Vol.138, p.479-485

MADRID, J. A. Cabrera; García, J. I. Escalante; Borges P. Castro. Resistencia a la compresión de concretos con escoria de alto horno. Estado del arte revisitado. Revista ALCONPAT, 2016, Vol.6 (1), p.64-83

Mendivil Escalante, José M; Gómez Soberón, José Manuel Vicente; Almaral Sánchez, Jorge Luis ; Cabrera Covarrubias, Francisca Guadalupe. Mendivil Escalante, José M; Gómez Soberón, José Manuel Vicente; Almaral Sánchez, Jorge Luis ; Cabrera Covarrubias, Francisca Guadalupe. Materials 2017, 10(2), 176

LIU, H.; Jia, Y.; Niu, C. O conceito de "Cidade da esponja" ajuda a resolver os problemas urbanos de água da China. Environ. Terra Sci. 2017, 76, 473

LIU, Yong; Li, Tian; Yu, Long. Urban heat island mitigation and hydrology performance of innovative permeable pavement: A pilot-scale study. Journal of cleaner production, 2020, Vol.244, p.118938

MAINES, Alexandre; Riffel, Elias; Pruner, Lenon Henrique Da Costa; Knoblauch; Jaison H. De Oliveira. Influência dos agregados sobre as propriedades do concreto permeável. Revista da Unifebe, Número 27, 2022.

Martin, W.D., Kaye, N.B. Kaye, Putman, B.J. Impact of vertical porosity distribution on the permeability of pervious concrete, Constr. Build. Mater. 59 (2014) 78–84.

MATOS, C.; BRIGA SÁ, A.; BENTES. I.; PEREIRA. S.; BENTO.R. An approach to the implementation of Low Impact Development measures towards an EcoCampus classification. Journal of Environmental Management. Volume 232, 15 February 2019, Pages 654-659.

MENEGATTI, Lucas Caon; ROCHA, Camila A. Abelha. Influência do teor de pasta de cimento na permeabilidade e na resistência do concreto permeável. 61º Congresso Brasileiro do Concreto, Fortaleza (CE), 2019.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

MIKAMI, R. J.; Kummer, A.C.B.; Döl, M.M.R. Leaching of Pervious Concrete Produced Using Mixed Recycled Aggregates. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2020.

MIKAMI, R. J. Dosagem e otimização de misturas de concreto permeável por controle de porosidade pelo método do grau de compactação. Tese de Doutorado em Engenharia e Ciência de Materiais, na Universidade Estadual de Ponta Grossa (PR), 2022.

MULYONO; Anisah. Laboratory Experiment: Pervious Concrete for Permeable Pavement, Focus in Compressive Strength and Permeability. Earth and environmental science, 2019, Vol.366 (1), p.12019

Neptune, A.I. Putman, B.J. Putman, Effect of Aggregate Size and Gradation on Pervious Concrete Mixtures, ACI Mater. J. (2010)

NILIMAA, Jonny. Smart materials and technologies for sustainable concrete construction. Developments in the built environment. Volume 15, October 2023, 100177

Oliveira, F. R. de., França, S. L. B., & Rangel, L. A. D.. (2019). Princípios de economia circular para o desenvolvimento de produtos em arranjos produtivos locais. Interações (campo Grande), 20(4), 1179–1193. <https://doi.org/10.20435/inter.v20i4.1921>

OLIVEIRA JÚNIOR, José Mamede Rebouças de; ARAÚJO, Carla Beatriz Costa de; AYRES, Thiago Moura da Costa. Estudo comparativo entre as misturas solo-seixo e solo-brita para fins de pavimentação. Revista Tecnologia, Fortaleza, v.39, n.1, p.1-18, jun. 2018.

OLIVEIRA, Thainá Maria da Costa. A influência dos agregados reciclados de resíduos da construção civil nas propriedades do concreto permeável: uma revisão sistemática. Dissertação, Tucuruí-PA, 2023

RAMOS, Matheus Oliveira; PINHEIRO, Matheus Oliveira Ramos; JUNIOR, Matheus Oliveira Ramos. Influência da porosidade na condutividade térmica, resistência mecânica e coeficiente de permeabilidade do concreto. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais - Mai 2021, v. 12 n. 5 (2021).

RIBEIRO, J. M.; SILVA, T. S. M. Pavimentos de concretos permeáveis: a otimização da relação água/cimento. Trabalho de Conclusão de Curso. Belém-PA, 2018.

SALLES, Pedro Valle; GOMES, Camila Lacerda; POGGIALI, Flávia Spitale Jacques; RODRIGUEZ, Conrado de Souza. A importância de considerar a qualidade dos agregados reciclados em relação à presença de contaminantes como materiais orgânicos, metais pesados e outros elementos nocivos à saúde e ao meio ambiente. Ambient. constr. 21 (3); 2021.

Sambito, Mariacrosetta ; Severino, Alessandro ; Freni, Gabriele ; Neduzha, Larysa. A Systematic Review of the Hydrological, Environmental and Durability Performance of Permeable Pavement Systems. Sustainability 2021, 13(8), 4509, 2021.

Santos, C. J. B. M. Captura de carbono em placas de concreto permeável. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, 2020.

Sartip, Mohsen; Sartip, Farid. Stormwater retention using pervious concrete pavement: Great Western Sydney case study. Construction Materials, Volume 11, December 2019, e00274

Sehgal, Kirti; Drake, Jennifer ; Seters, Tim ; Vander Linden, William. Improving Restorative Maintenance Practices for Mature Permeable Interlocking Concrete Pavements. Water (Basel), 2018, Vol.10 (11), p.1588

Shafique, Muhammad; Kim, Reeho; Kyung-Ho, Kwon. Rainfall Runoff Mitigation by Retrofitted Permeable Pavement in an Urban Area. Sustainability 2018, 10(4), 1231.

Silva, A. A. P.; Ribeiro, J. M.; Leal, V. T.; Cordeiro, L. N. P. Propriedades mecânicas e permeabilidade de concretos permeáveis com aditivo superplastificante. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 15, n. 2 (2020) 110-117 ISSN 1809-8797

SILVA, Arthur Aviz Palma; LEAL, Victor Tavares. Influência da Incorporação de Aditivos na produção de concreto poroso. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil - Universidade Federal do Pará (UFPA), 2018.

Silva, R.V.; de Brito, J. ; Dhir, R.K.. Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete. Construction & building materials, 2015, Vol.83, p.108-118

SINGH, Avishreshth; SAMPATH, Prasanna Venkatesh; BILIGIRI, Krishna Prapoorna. A review of sustainable pervious concrete systems: Emphasis on clogging, material characterization, and environmental aspects. Construction and Building Materials, Volume 261, 2020.

SOARES, H.; BRAGA, N.; CASTRO, C.; CORDEIRO, L. Análise do Comportamento de águas pluviais em placas de concreto permeável. In: Encontro Nacional de Tecnologia do ambiente construído, 18., 2020. ANTAC, Porto Alegre, 2020. p. 1–8.

Srubar, Wil V. Stochastic service-life modeling of chloride-induced corrosion in recycled-aggregate concrete. Cement and Concrete Composites. Volume 55, January 2015, Pages 103-111

STRIEDER, H.L. Estudo do uso de agregados de concreto reciclado em concreto permeável para pavimentos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2021.

Strieder, Helena Lunkes ; Dutra, Vanessa Fátima Pasa ; Graeff, Ângela Gaio ; Núñez, Washington Peres ; Merten, Felipe Raul Meert. Performance evaluation of pervious concrete pavements with recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*. Volume 315, 2022, 125384.

Tam, Vivian W.Y.; Soomro, Mahfooz; Evangelista, Ana Catarina Jorge. Quality improvement of recycled concrete aggregate by removal of residual mortar: A comprehensive review of approaches adopted. *Construction & building materials*, 2021, Vol.288, p.123066.

TAVARES, L. M.; KAZMIERCZAK, C. S. The influence of recycled concrete aggregates in pervious concrete. *Rev. IBRACON Estrut. Mater.* 9 (1); 2016

Tennis, P. D.; Leming, M. L.; Akers, D. J. *Pervious Concrete Pavements*, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, And National Ready Mixed Concrete Association, Silver Spring, Maryland, USA, 36 P. 2004.

UNITED NATIONS (UN). Climate Action: COP26. Disponível em <<https://www.un.org/en/climatechange/cop26>>, 2021.

Välimäki, Marja K.; Sokka, Laura I. ; Peltola, Heidi B. ; Ihme, Sami S. ; Rokkonen, Teijo M. J. ; Kurkela, Timo J. ; Ollila, Jyrki T. ; Korhonen, Arttu T. ; Hast, Jukka T. 1. Printed and hybrid integrated electronics using bio-based and recycled materials—increasing sustainability with greener materials and technologies. *International journal of advanced manufacturing technology*, 2020, Vol.111 (1-2), p.325-339

Xie, Jianhe ; Huang, Liang ; Guo, Yongchang ; Li, Zhijian ; Fang, Chi ; Li, Lijuan; Wang, Junjie. Experimental study on the compressive and flexural behaviour of recycled aggregate concrete modified with silica fume and fibres. *Construction and Building Materials*. Volume 178, 2018, Pages 612-623

Xu, Fang; Li, Xiaoyan ; Xiong, Qiuyang ; Li, Yunfan ; Zhu, Jing ; Yang, Fan ; Sun, Tao ; Peng, Chao ; Lin, Juntao. Influence of aggregate reinforcement treatment on the performance of geopolymer recycled aggregate permeable concrete: From experimental studies to PFC 3D simulations. Construction and Building Materials. Volume 354, 2022, 129222.

Yang, Huan. Statistical Characteristics of Recycled Aggregate Permeable Concrete. Journal of Physics: Conference Series, Volume 2202. China, 2022. - YAP, Soon Poh; CHEN, Paul Zhao Chiat; GOH, Yingxin; IBRAHIM, Hussein Adebayo; MO, Kim Hung; YUEN, Choon Wah. Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates. Journal of Cleaner Production. Volume 181, 2018, Pages 155-165.

Yu, Lanzhen; Huang, Lili ; Ding, Hui. Rheological and Mechanical Properties of Ultra-High-Performance Concrete Containing Fine Recycled Concrete Aggregates. Materials 2019, 12(22), 3717.

Yazici, Ş.; Mardani-Aghabaglou, A. Effect of aggregate grain size distribution on properties of permeable concrete. Journal of fundamental and applied sciences, 2017, Vol.9 (1), p.323

Wang, Shunxiang; Zhang, Guofang ; Wang, Bo ; Wu, Min. Mechanical strengths and durability properties of pervious concretes with blended steel slag and natural aggregate. Journal of cleaner production, 2020, Vol.271, p.122590

Witkowski, Hubert ; Koniorczyk, Marcin. The influence of pozzolanic additives on the carbonation rate and Life Cycle Inventory of concrete. Construction & building materials, 2020, Vol.254, p.119301

Wu, Ruidong ; Shi, Shuning ; Shen, Yu ; Hu, Chen ; Luo, Mengfei ; Gan, Zichen ; Xiao, Bin ; Wang, Zeyu. Effects of Different Factors on the Performance of Recycled Aggregate Permeable Pavement Concrete. Materials 2022, 15(13), 4566. China, 2022.

Wu, Ruidong; Shi, Shuning ; Shen, Yu ; Hu, Chen ; Luo, Mengfei ; Gan, Zichen ; Xiao, Bin ; Wang, Zeyu. Effects of Different Factors on the Performance of Recycled Aggregate Permeable Pavement Concrete. *Materials* 2022, 15(13), 4566.

ZAETANG, Y.; SATA, V.; WONGSA, A.; CHINDAPRASIRT, P. Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 111, 2016

ZHONG, R. et al. Research and application of pervious concrete as a sustainable pavement material: A state-of-the-art and state-of-the-practice review. *Construction and Building Materials*, v. 183, p. 544–553, 2018.

Zhu, Lihua; Wen, Taihong ; Tian, Long. Size effects in compressive and splitting tensile strengths of polypropylene fiber recycled aggregate concrete. *Construction & building materials*, 2022, Vol.341, p.127878